LUZ INMOVILIZADA • LA CONSTRUCCION DE UN HIPERORDENADOR

INVESTIGACION y CIENCIA

SEPTIEMBRE 2001
800 PTA. 4,81 EURO

Edición española de SCIENTIFIC AMERICAN

Motores moleculares

- Películas bacterianas
- La hipnosis
- El astrario de Giovanni Dondi







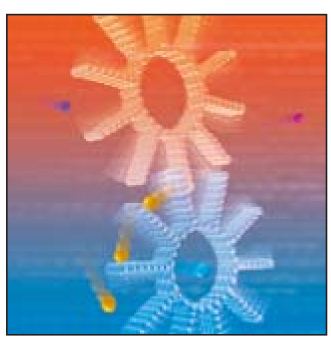
Septiembre de 2001 Número 300

SECCIONES

52	61	4	13	20	29	36	45
14	3	62	51	46	35	30	19
53	60	5	12	21	28	37	44
11	6	59	54	43	38	27	22
55	58	7	10	23	26	39	42
9	8	57	56	41	40	25	24
50	63	2	15	18	31	34	47
16	1	64	49	48	33	32	17

Edición española de SCIENTIFIC AMERICAN

SECCIONES



Portada: Philip Howe

PROCEDENCIA DE LAS ILUSTRACIONES

Página	Fuente
4-5	Chip Simons
7	Samuel Velasco
8	Laurie Grace
9	Chip Simons
11	Samuel Velasco (*dibujo*); Laurie Grace (*gráficas*)
14-21	Olivier Laude
23-24	Kyoko Hamada
26	Pierre Rainville et al., *Science*, vol. 277, 15 de agosto de 1997
41-44	Philip Howe
45	Philip Howe y Kevin Ring
46	Philip Howe
47	Heiner Linke (*punto cuántico*); Roderick MacKinnon, A. Doyle, et.al, *Science*, vol. 280; 1998, ©1998 AAAS (*canal de iones*)
48	Philip Howe
49	Pour la Science
50	©1998, École des chartes
51-53	Pour la Science
54	Sam Ogden
55	Louise McLaughlin-Borlace, Inst. de Oftalmología, Dpto. de Patología, Londres, con licencia de ASM MicrobeLibrary
56-57	Sam Ogden; R. Bos, H. J. Busscher, W. L. Jongebloed y H. C. Van der Mei, con licencia de ASM MicrobeLibrary (*micrografía*)
58-59	Keith Kasnot; Gordon McFeters, Universidad del Estado de Montana, con licencia de ASM MicrobeLibrary (*micrografía*)
60-61	Sam Ogden; Rodney Donlan y Donald L. Gibbon, con licencia de ASM MicrobeLibrary (*micrografía*)
63-68	Concepción Rodríguez Esteban, Angel Raya, Javier Capdevila y Juan Carlos Izpisúa Belmonte
71-76	Angel Pestaña
80-85	Jerome Kuhl
86-88	Juan M. R. Parrondo
89	Johnny Johnson
90-91	George Retseck

COLABORADORES DE ESTE NUMERO

Asesoramiento y traducción:

Juan Pedro Adrados: *Luz inmovilizada*; Francisco Gracia García-Miguel: *La construcción de un hiperordenador*; José Manuel García de la Mora: *El trance hipnótico*; José Chabás: *El astrario de Giovanni Dondi*; Víctor Ruiz Pérez: *Películas bacterianas*; Luis Bou: *Aventuras problemáticas*; Angel Garcimartín: *Perfiles*; J. Vilardell: *Hace...* e *Ideas aplicadas*

Ciencia y sociedad:

Luis Bou: *Los cuadrados perdidos de Franklin*; Manuel Ritoré: *Agua antiadherente*; Ramón Pascual: *La doble personalidad de los neutrinos*

INVESTIGACION Y CIENCIA

DIRECTOR GENERAL Francisco Gracia Guillén
EDICIONES José María Valderas, *director*
ADMINISTRACIÓN Pilar Bronchal, *directora*
PRODUCCIÓN M.ª Cruz Iglesias Capón
Bernat Peso Infante
SECRETARÍA Purificación Mayoral Martínez
EDITA Prensa Científica, S. A. Muntaner, 339 pral. 1.ª – 08021 Barcelona (España)
Teléfono 93 414 33 44 Telefax 93 414 54 13

SCIENTIFIC AMERICAN

EDITOR IN CHIEF John Rennie
MANAGING EDITOR Michelle Press
ASSISTANT MANAGING EDITOR Ricki L. Rusting
NEWS EDITOR Philip M. Yam
SPECIAL PROJECTS EDITOR Gary Stix
SENIOR WRITER W. Wayt Gibbs
EDITORIAL DIRECTOR, ON-LINE Kristin Leutwyler
EDITORS Mark Alpert, Steven Ashley, Graham P. Collins, Carol Ezzell, Steve Mirsky, George Musser y Sarah Simpson
PRODUCTION EDITOR Richard Hunt
VICE PRESIDENT AND MANAGING DIRECTOR, INTERNATIONAL Charles McCullagh
PRESIDENT AND CHIEF EXECUTIVE OFFICER Gretchen G. Teichgraeber
CHAIRMAN Rolf Grisebach

SUSCRIPCIONES

Prensa Científica S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona (España)
Teléfono 93 414 33 44
Fax 93 414 54 13

Precios de suscripción:

	Un año	Dos años
España	8.800 pta. 52,89 euro	16.000 pta. 96,16 euro
Extranjero	11.500 pta. 69,12 euro	21.500 pta. 129,22 euro

Ejemplares sueltos:

Ordinario: 800 pta. 4,81 euro
Extraordinario: 1.000 pta. 6,01 euro

—El precio de los ejemplares atrasados es el mismo que el de los actuales.

DISTRIBUCION

para España:

LOGISTA, S. A.
Aragoneses, 18 (Pol. Ind. Alcobendas)
28108 Alcobendas (Madrid)
Tel. 91 484 39 00

para los restantes países:

Prensa Científica, S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª – 08021 Barcelona
Teléfono 93 414 33 44

PUBLICIDAD

GM Publicidad
Francisca Martínez Soriano
Menorca, 8, semisótano, centro, izquierda.
28009 Madrid
Tel. 91 409 70 45 – Fax 91 409 70 46

Cataluña y Baleares:
Miguel Munill
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona
Tel. 93 321 21 14
Fax 93 414 54 13



ISSN 0210136X Dep. legal: B. 38.999 – 76

Filmación y fotocromos reproducidos por Dos Digital, Zamora, 46-48, 6ª planta, 3ª puerta - 08005 Barcelona
Imprime Rotocayfo-Quebecor, S.A. Ctra. de Caldes, km 3 - 08130 Santa Perpètua de Mogoda (Barcelona)

Printed in Spain - Impreso en España

HACE...

...cincuenta años

DE VUELTA A CASA. «Arthur Hasler y Warren Wisby, de la Universidad de Wisconsin, proponen una explicación para uno de los misterios más simpáticos de la naturaleza, como es la vuelta a sus rías natales de los salmones desde centenares de millas mar adentro. Su opinión es que olfatean su camino de regreso. "Parece que hay sustancias en el agua, probablemente procedentes de la vegetación y de los suelos de las zonas por las que discurre la corriente, que le dan a cada una un olor que los salmones pueden percibir, recordar y reconocer incluso después de mucho tiempo." El represado de muchas de las corrientes salmoneras de la costa del Pacífico está acarreando la consecuencia de una disminución progresiva de las capturas anuales, pues grandes cantidades de salmones encuentran la muerte al tratar de saltar las presas que se interponen en su viaje de retorno a casa.»

INGENIEROS. «Poco más del cinco por ciento de la energía industrial americana la suministraban máquinas en 1850; el 79 por ciento se debía a animales y el quince por ciento a los músculos humanos. Hoy día el 84 por ciento de la energía la suministran máquinas, el doce por ciento animales y el cuatro por ciento personas. Una consecuencia es que los ingenieros se han convertido en un importante factor de nuestra civilización. Hay más de 400.000 de ellos en EE.UU. y la ingeniería es actualmente la tercera profesión más extendida, superada sólo por la enseñanza y por la asistencia sanitaria. Pero hay una aguda escasez de ingenieros y el número de graduados de los próximos años será muy inferior a las necesidades.»



INGENIERO, 1951: lápices, tinta, plantillas de curvas y cigarrillos

...cien años

OXÍGENO PARA AERONAUTAS. «El francés Louis-Paul Cailletet ha ideado un aparato con el fin de suministrar oxígeno puro a los aeronautas cuando estén suspendidos a grandes altitudes, donde la extrema rarefacción del aire los expone a la asfixia. Cuando un aeronauta experimente la náusea debida al aire rarificado, recurrirá a una reserva de oxígeno. Esta consiste en una doble botella de gas llena de oxígeno líquido. Del depósito sale un tubo flexible unido a una pequeña máscara metálica forrada de terciopelo por fuera para protegerla del frío.»

EL OKAPI DESCUBIERTO. «De gran importancia son los descubrimientos en Uganda de sir Harry Johnston. Uno de los animales descubiertos por él es el "okapi". Pertenece a un grupo de rumiantes representados actualmente sólo por la jirafa y el antílope, llamado berrendo, de Norteamérica. Hasta donde ha podido comprobarse, el okapi es un representante vivo del género *Hellatotherium*, representado por una forma extinta hallada como fósil en Grecia y en Asia Menor. El animal tiene el tamaño aproximado de un buey. Su coloración es quizás única entre los mamíferos. Su cuerpo es rojizo, con un pelo corto y lustroso. Sólo las patas y los cuartos traseros del animal se muestran rayados.»

...ciento cincuenta años

SEGADORA MECÁNICA. «En *Illustrated London News* se dice: "Durante la recolección anual en la granja de Mechi la máquina de segar de McCormick superó muy bien las pruebas. Llovió a mares y el barro y la paja húmeda no tardaron en atorar los otros útiles; pero tenemos el autorizado testimonio, entre otros, del señor Fisher Hobbs, el conocido ingeniero agrónomo, de que la máquina de McCormick ejecutó su trabajo perfectamente y demostró ser una de las invenciones agrícolas más valiosas de la época. Llega en el momento oportuno, cuando la emigración estable de los jornaleros irlandeses amenaza con dejar a nuestros granjeros faltos de mano de obra en cada cosecha. El propietario está dispuesto a atestiguar que no le estorbó la envidia británica y que su éxito fue aclamado con todo el calor que el húmedo tiempo permitía."» [*Nota de la redacción: McCormick es considerado el inventor de la primera segadora mecánica que llegó a funcionar.*]

NUESTROS PRIMEROS AÑOS. «Desde nuestros modestos comienzos, hace seis años, *Scientific American* ha conseguido una muy honorable posición en cuanto a circulación, con la influencia y utilidad consiguientes. Nadie puede gastar dos dólares con más provecho que suscribiéndose a nuestra revista. Esperamos confiados a más de 20.000 compradores para nuestro nuevo volumen. Cuanto mayor sea la demanda, mejor atenderemos a nuestros lectores.»

Luz inmovilizada

Nuevas posibilidades para las comunicaciones ópticas y para los ordenadores cuánticos, e incluso la posibilidad de experimentar con agujeros negros, podrían resultar del retardo de los haces de luz hasta llegar a pararlos

Lene Vestergaard Hau



Todo el mundo sabe que la velocidad de la luz es una de las propiedades inamovibles del universo. No es, pues, sorprendente que los experimentos que intenten alterar radicalmente la velocidad de la luz exijan un equipamiento importante y duro trabajo. En primer lugar se requiere una cuidadosa preparación y la exquisita puesta a punto del montaje, procediéndose luego a un largo período de esmerada recogida de datos para obtener un conjunto consistente de medidas. Los experimentos originales de luz retardada que nosotros hemos realizado en el Instituto Científico Rowland de Cambridge, Massachusetts, se realizaron generalmente en turnos de 27 horas ininterrumpidas. Fue necesario aprender a comer con una mano mientras con la otra se ponían y se quitaban a oscuras los espejos de una mesa óptica durante los 38 segundos que constituían una etapa decisiva de cada secuencia experimental.

Nuestra meta era reducir drásticamente la velocidad de la luz, que viaja a través del espacio vacío al límite extremo universal de velocidad de casi 300.000 kilómetros por segundo. Vimos los primeros signos de pulsos de luz que se retardaban en marzo de 1998. Como sucede muy a menudo en física experimental —porque se pueden tardar muchas horas en conseguir que todas las partes funcionen al unísono por primera vez—, esto ocurría en horas de madrugada, a las cuatro de la mañana. En julio habíamos logrado llegar hasta la velocidad de un avión. Por esa época tuve que acudir al Instituto Niels Bohr en Copenhague para dar unas clases. Recuerdo que mientras estaba sentada en el avión pensé en el hecho curioso de que estaba viajando “más deprisa que la luz”, que en mi viaje a Dinamarca podía sacarle una ventaja de una hora entera a uno de nuestros pulsos retardados.

No hace falta decir que durante toda esa semana estuve inquieta e impaciente por regresar a Cambridge para continuar con los experimentos de retardo de la luz. Durante el mes siguiente alcanzamos los 60 kilómetros por hora y decidimos que era tiempo de publicar los resultados. Antes de ese momento la verdadera recompensa por el duro trabajo era sentarse en el laboratorio en mitad de la noche y observar los pulsos de luz retardada, sabiendo que éramos las primeras personas del mundo que veían cómo la luz iba tan despacio que se la podía adelantar montado en una bicicleta.

A finales del año pasado llevamos el proceso hasta su lógica pero sorprendente conclusión: hicimos que los pulsos de luz se parasen completamente dentro de diminutas nubes gaseosas enfriadas hasta



1. LA INMOVILIZACION DE LA LUZ comienza con un proceso en el que un haz de láser cuidadosamente sintonizado convierte a un material opaco en transparente para un segundo haz de láser.

las cercanías del cero absoluto. Por decirlo de algún modo, pudimos mantener los pulsos congelados durante unos momentos y hacer luego que prosiguieran su camino.

Aparte de su gran interés intrínseco, la inmovilización y el retardo de la luz tienen un cierto número de aplicaciones. Las nubes ultrafrías de átomos usadas en nuestros experimentos de luz retardada forman condensados de Bose-Einstein a una temperatura suficientemente baja, extraordinarios sistemas en los que todos los átomos se reúnen en un único estado cuántico y actúan sincronizadamente. Enviando un pulso de luz a través de un condensado que se mueva tan despacio como lo hace una onda acústica, a consecuencia de lo cual esperamos que una onda de átomos se "deslice" sobre el pulso de luz, podrían hacerse nuevos estudios de los condensados de Bose-Einstein, por ejemplo.

El trabajo sobre la luz retardada e inmovilizada abre también nuevas posibilidades para las comunicaciones ópticas, para el almacenamiento de datos y para el tratamiento cuántico de la información, es decir, para los ordenadores cuánticos, que usarían fenómenos cuánticos para superar el rendimiento de los ordenadores corrientes. Lo que hace esencialmente el sistema de inmovilización de la luz es permutar entre formas estáticas de información cuántica y fotones que se desplazan a la velocidad normal de la luz.

Manejo de átomos

Muchas sustancias corrientes retardan la luz. Por ejemplo, el agua la retarda hasta aproximadamente un 75 por ciento de su velocidad en el vacío. Pero ese tipo de reducción de velocidad, asociado al índice de refracción de una sustancia, es limitado. El diamante, que tiene uno de los mayores índices de refracción de cuerpos transparentes, retarda la luz en un factor de sólo 2,4. Si se quiere reducir la velocidad de la luz en factores de decenas de millones hay que acudir a nuevos efectos que dependen de la mecánica cuántica. Nosotros generamos las condiciones necesarias para estos efectos en una nube de átomos de sodio con forma de puro —cuyas dimensiones normales son de 0,2 milímetros de longitud y 0,05 milímetros de diámetro— atrapada en un campo magnético y enfriada hasta una millonésima de grado por encima del cero absoluto.

El sodio pertenece a la familia de átomos alcalinos, que tienen un único electrón externo, o de valencia. Este electrón es el que lo hace casi todo. Los diferentes estados excitados de un átomo de sodio corresponden a la estimulación de ese único electrón hacia órbitas más alejadas del núcleo, dotadas de mayor energía que su estado normal o fundamental, que es el de menor energía. Estos estados son los que determinan la relación del átomo con la luz, como qué frecuencias absorberá con mayor intensidad y otros hechos semejantes. Tanto el electrón de valencia como el núcleo del átomo son además magnéticos, actuando en efecto como diminutas agujas de brújula. El magnetismo del electrón está asociado con su momento angular intrínseco, o espín, algo semejante a la asociación del eje rotacional terrestre con el norte magnético, pero con un alineamiento exacto. Las energías precisas de los estados excitados de un átomo dependen de cómo estén alineados los espines del núcleo y del electrón de valencia.

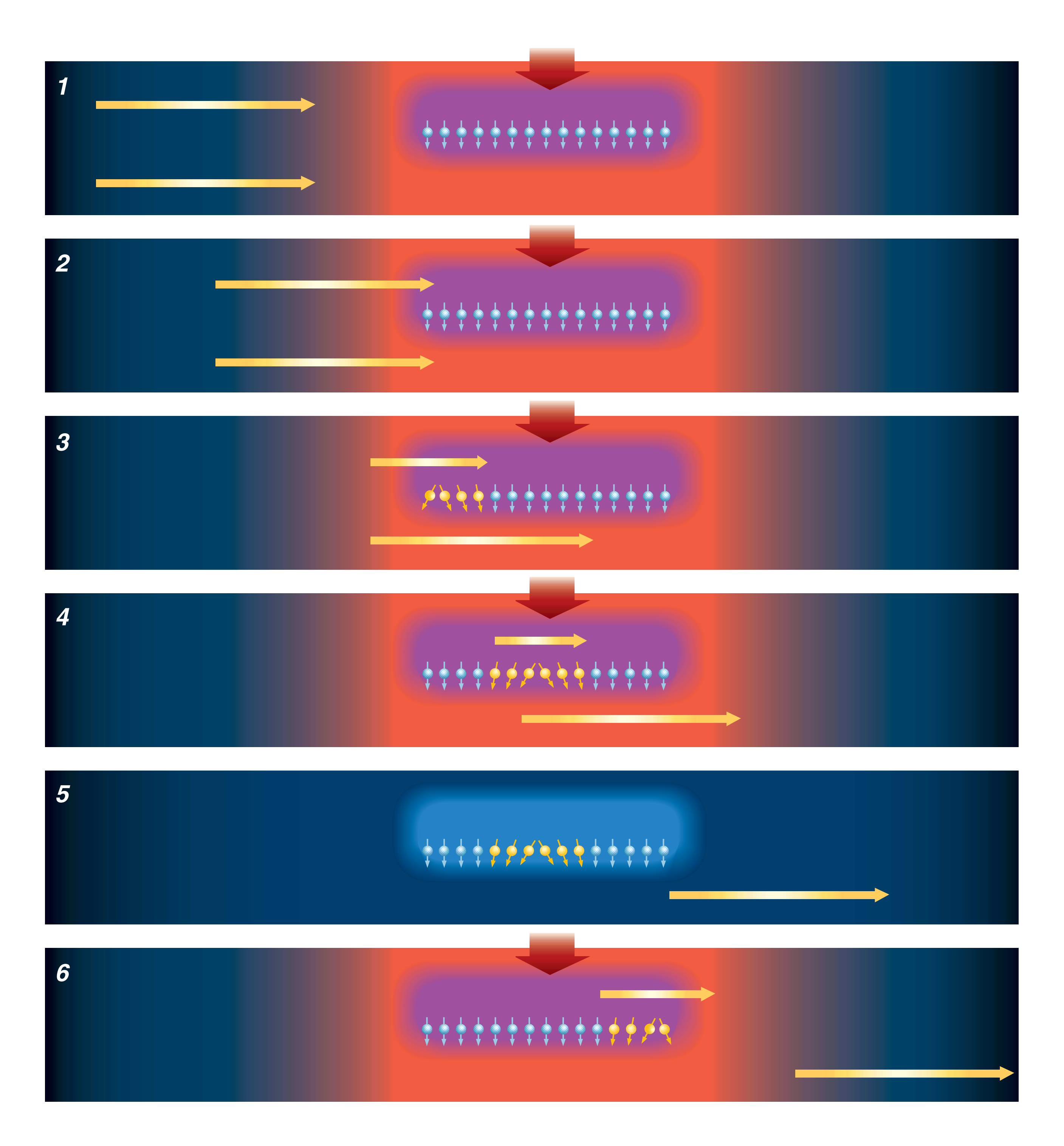
Aunque un átomo pueda asumir muchos de estos estados, usamos sólo tres de ellos para retardar la luz. Cuando acabamos de preparar y de enfriar la nube de átomos de nuestros experimentos, cada uno de ellos está en el estado 1, su estado fundamental: el electrón de valencia está en su órbita más baja y su espín es exactamente opuesto, o está antialineado, con el espín nuclear. El estado 2 es un estado muy similar, justo con los espines del electrón y del núcleo alineados, lo que eleva ligeramente la energía del átomo. El estado 3 tiene una energía unas 300.000 veces mayor que el estado 2 y se produce al impulsar el electrón de valencia hacia una órbita superior. Los átomos que se relajan del estado 3 hacia los estados 1 o 2 generan el característico brillo amarillo de las luces de sodio del alumbrado público.

El pulso de luz que deseamos retardar está sintonizado a la diferencia de energía entre los estados 1 y 3. Si enviásemos un pulso de esa luz hacia la nube sin realizar ninguna otra preparación, los átomos ab-

2. LUZ PARADA: Antes de que el pulso de luz (*amarillo*) alcance la nube de átomos (*azul*) que lo inmovilizará, todos los espines de los átomos (*flechas pequeñas*) están alineados y un haz de láser de acoplamiento (*rojo*) convierte la nube en transparente para el pulso (*1, 2*). La nube retarda y comprime mucho el pulso y los estados de los átomos cambian en una onda que acompaña a la luz retardada (*3*). Cuando el pulso está completamente dentro de la nube (*4*), se apaga el haz de acoplamiento (*5*), deteniendo la onda y la luz; la luz se desvanece a velocidad cero. Luego se enciende de nuevo el haz de acoplamiento, regenerando el pulso de luz, que vuelve a ponerse en movimiento (*6*).

Resumen / Cómo parar la luz

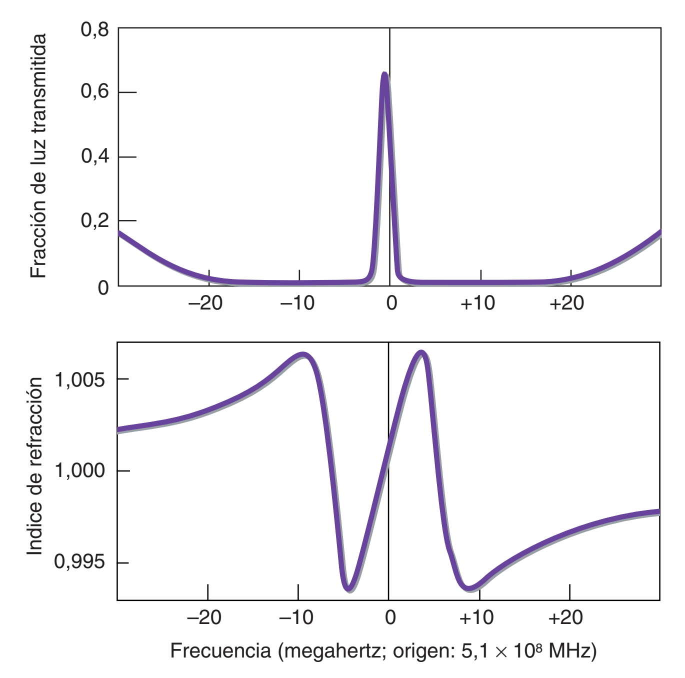
- No hay nada que se desplace más deprisa que la luz en el vacío, pero incluso ella va más lenta en muchos otros medios. Se han manipulado nubes de átomos con láseres de forma que los pulsos de luz se muevan a través de ellas a una veintemillonésima de su velocidad normal, ritmo que es más lento que el tráfico de una autopista.
- Una técnica parecida detiene completamente los pulsos, convirtiéndolos en una huella cuántica almacenada en los átomos. Otro haz de láser torna luego el pulso inmovilizado en un pulso de luz en movimiento que tiene todas las propiedades del original.
- El proceso de retardar y detener la luz tiene muchas aplicaciones técnicas y de investigación.



sorberían totalmente el pulso y saltarían del estado 1 al estado 3. Los átomos excitados se relajarían muy poco después reemitiendo la luz, pero de forma aleatoria y en todas direcciones. La nube brillaría con un color amarillo brillante, pero se perdería toda la información sobre el pulso original.

Para evitar esta pérdida echamos mano de la transparencia inducida electromagnéticamente, un fenómeno observado por primera vez por el grupo de Stephen E. Harris en la Universidad de Stanford. Consiste en hacer que un haz de láser cuya frecuencia se ha escogido cuidadosamente incida sobre la nube, logrando que, de ser tan opaca como una pared para luz de otra frecuencia específica, se transforme en tan transparente como el vidrio.

El haz que induce la transparencia, o haz de acoplamiento, está sintonizado a la diferencia de energía entre los estados 2 y 3. Los átomos que se encuentran en el estado 1 no pueden absorberlo. Cuando llegan los pulsos de luz de un tercer haz, llamado de exploración, sintonizado al estado 3, los dos haces desplazan los átomos hasta una superposición cuántica de los estados 1 y 2, lo que significa que cada átomo está en ambos estados simultáneamente. El estado 1 por sí solo absorbería la luz de exploración y el estado 2 absorbería el haz de acopla-



3. PROPIEDADES OPTICAS inducidas en una nube de átomos por un haz de láser cuidadosamente sintonizado son la clave para el proceso de retardo de la luz. Un haz de láser de acoplamiento que pasa a través de la nube la hace transparente para luz de una frecuencia exacta (*arriba*) y causa una brusca variación asociada de su índice de refracción (*abajo*). La transparencia permite que la luz adecuadamente sintonizada pase a través de la nube sin que sea absorbida. Cuanto más brusco sea el cambio en el índice de refracción, más lentamente se desplazará la luz.

miento. El resultado sería el desplazamiento de algunos átomos hacia el estado 3, que entonces emitiría la luz aleatoriamente. Pero al actuar juntos ambos procesos se cancelan, como dos competidores igualados en una competición de tira y afloja, efecto llamado interferencia cuántica. El estado de superposición se llama estado oscuro porque los átomos son esencialmente incapaces de ver los haces (permanecen "en la oscuridad"). Los átomos resultan transparentes al haz de exploración porque no pueden absorberlo en el estado oscuro. Que una superposición resulte o no oscura, o qué proporción de estados 1 y 2 se necesite, es cosa que varía según las cantidades de luz que de los haces de exploración y de acoplamiento incidan en cada punto, aunque cuando el sistema comienza en un estado oscuro (es decir, 100 por ciento de haz de acoplamiento y 100 por ciento de estado 1), permanece en él tras la activación del haz de exploración.

Un proceso de cancelación parecido hace que el índice de refracción sea 1 —como en el espacio vacío— para la luz sintonizada precisamente con el estado 3. Si las frecuencias son ligeramente diferentes, la cancelación es menos exacta y el índice de refracción cambia. Un pulso corto de luz "se huele" esta variación del índice porque los pulsos contienen en realidad un pequeño intervalo de frecuencias. Cada una de ellas ve un índice de refracción diferente y por lo tanto viaja a una velocidad diferente. Esta velocidad, que es la de un haz continuo de una frecuencia pura, es la velocidad de fase. El pulso de luz se sitúa donde todos estos componentes estén exactamente sincronizados o, hablando más técnicamente, estén en fase. En un medio corriente, como el aire o el agua, todos los componentes se mueven prácticamente a la misma velocidad y el lugar donde están sincronizados —la posición del pulso— también viaja a esa velocidad. Cuando los componentes se mueven con el intervalo de velocidades presente en los átomos transparentes, el lugar donde están sincronizados se va desplazando progresivamente hacia atrás; en otras palabras, el pulso se retarda. La velocidad del pulso se llama velocidad de grupo, porque el pulso consta de un grupo de haces de diferentes frecuencias.

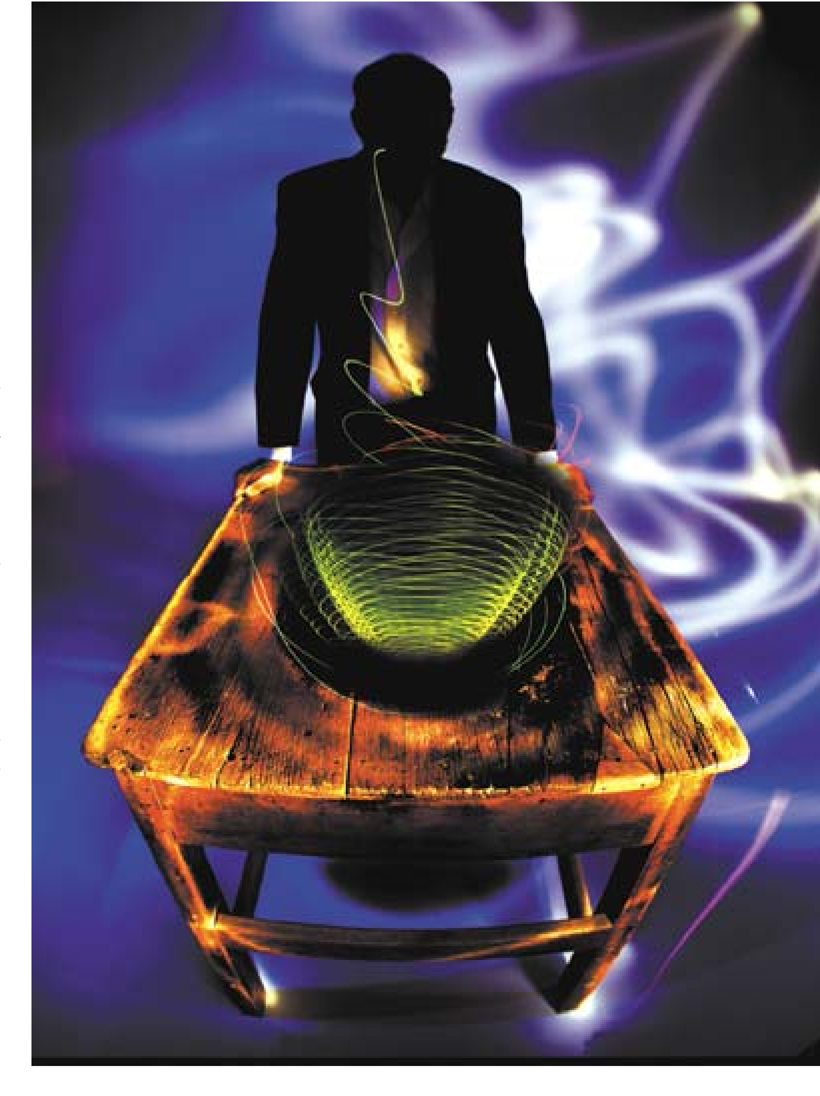
Este proceso difiere en varios aspectos importantes del retardo usual que un medio con un índice de refracción mayor de uno produce en la luz: la velocidad de grupo se retarda, pero no la velocidad de fase; el retardo lo produce la variación brusca del índice de refracción y no un valor grande del propio índice; y, en fin, el haz del láser de acoplamiento ha de estar presente durante todo el tiempo.

Atomos ultrafríos para inmovilizar la luz

Cuanto más rápidamente cambia el índice de refracción con la frecuencia, tanto más lentamente se desplaza el pulso. La rapidez con la que puede cambiar el índice viene limitada por el efecto Doppler: el incesante movimiento de los átomos del gas descompone cada estado en un pequeño intervalo de energías. El efecto Doppler es como el cambio de tono de una sirena que se acerca o que se aleja de un observador. Imaginemos la cacofonía de tonos que se oiría si muchos coches de policía estuviesen acercándose y alejándose simultáneamente a diversas velocidades.

Nosotros utilizamos átomos extremadamente fríos (que se mueven lentamente) para minimizar este desdoblamiento Doppler. La consecuencia es que los estados de energía están bruscamente definidos y se puede estrechar el intervalo de frecuencias donde ocurre la cancelación. Se ha obtenido luz retardada en gases a temperatura ambiente por los grupos investigadores de Marlan O. Scully, de Dmitry Budker y de Ronald L. Walsworth y Mikhail D. Lukin. El uso de átomos calientes les evita tener que producir átomos ultrafríos, pero limita su capacidad para retardar la luz.

Enfriamos nuestros átomos de sodio con una combinación de haces de láser, de campos magnéticos y de ondas de radio. Los átomos emergen primeramente de una fuente caliente en forma de un haz intenso, que se mueve aproximadamente a 2600 kilómetros por hora. Un haz de láser choca frontalmente con los átomos y en un milisegundo los retarda hasta 160 kilómetros por hora, una deceleración de 70.000 g producida por un haz de láser que no produciría que-



4. AGUJERO NEGRO. La luz retardada atraída hacia un torbellino de átomos podría simular los fenómenos que pudieran ocurrir en el espaciotiempo deformado cercano a los agujeros negros.

maduras en un dedo. El haz pasa luego a una “melaza óptica” —seis haces de láser que inciden sobre los átomos desde todos los lados—, lo que los enfría hasta 50 millonésimas de grado por encima del cero absoluto. Nos bastan pocos segundos para acumular diez mil millones de átomos en la “melaza”. A continuación se apagan los haces de láser, sumergiendo el laboratorio en una oscuridad total, y se activan los electroimanes, cuyo campo combinado mantiene la nube de átomos en una especie de trampa. Durante 38 segundos se enfrían los átomos mediante una evaporación, expulsando los más calientes y conservando los más fríos. Ondas de radio específicamente sintonizadas ayudan a acelerar la salida de los átomos calientes. Todo el proceso —desde el haz caliente hasta los átomos fríos atrapados— tiene lugar dentro de una cámara en la que se ha hecho el vacío hasta 10^{-14} de atmósfera, lo que es una presión de un nanopascal, 10^{-9} Pa.

Cuando se enfría la nube hasta aproximadamente 500.000 millonésimas de grado, se forma un condensado de Bose-Einstein, un estado muy extraño de la materia en el que los varios millones de átomos que quedan después del enfriamiento por evaporación se comportan de una forma completamente sincronizada [*véase* “ El gas más frío del universo,” por Graham P. Collins; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, febrero 2001]. Estas nubes de átomos ultrafrías, suspendidas libremente en medio de una cámara de vacío por un campo magnético, son los lugares más fríos del universo, mientras que el resto de nuestro montaje experimental está a temperatura ambiente y situado a un centímetro de la nube. Las ventanas de la cámara nos permiten ver los átomos a simple vista durante el enfriamiento con láser: una nube fría de átomos en “melaza óptica” parece un pequeño sol brillante de cinco milímetros de diámetro. Este fácil acceso óptico nos permite “amasarlos” con haces de láser y obligarlos a hacer exactamente lo que queremos.

Cuando el cilindro de átomos fríos ya está en su sitio, se lo ilumina lateralmente con el láser de acoplamiento. Entonces se lanza un pulso de exploración a lo largo del eje del cilindro. La medida de la velocidad de la luz se hace de la manera más directa que se pueda imaginar: se sitúa detrás de la nube de átomos un detector de luz y se espera a que salga el pulso, anotando cuánto tarda. Inmediatamente después se mide la longitud de la nube con otro haz de láser, que incide desde abajo y proyecta su sombra en una cámara. La longitud dividida por el retardo del pulso nos da la velocidad. El intervalo de los retardos está comprendido habitualmente entre microsegundos y milisegundos, cosa que puede parecer poca, pero que equivale a hacer pasar la luz por kilómetros de fibra óptica enrollados en un carrete.

Cuando se retarda un pulso de luz veinte millones de veces sucede algo más que un simple cambio de velocidad. Cuando inicia su andadura el pulso tiene una longitud de un kilómetro y se desplaza a través del aire a casi 300.000 kilómetros por segundo. (Por supuesto, la longitud de nuestro laboratorio es muy inferior a un kilómetro, pero si pudiéramos colocar nuestro láser a esa distancia, sus pulsos tendrían esa longitud en el aire.) El borde frontal del pulso cruza la ventana de vidrio hacia la cámara de vacío y entra en el punto de átomos de sodio que está levitando. La luz viaja a 54 kilómetros por hora dentro de esta tenue nube. Un ciclista sobre una bicicleta de competición podría adelantar a esa luz retardada.

El autor

LENE VESTERGAARD HAU ocupa la cátedra Gordon McKay de Física Aplicada, es profesora de física en la Universidad de Harvard y dirige el Grupo de Enfriamiento de Atomos en el Instituto Científico Rowland en Cambridge, Massachusetts, donde se realizaron los experimentos detallados en este artículo. Se doctoró en física teórica del estado sólido en la Universidad de Århus en Dinamarca. La autora desea agradecer la colaboración sumamente fructífera del maravilloso equipo del Instituto Rowland compuesto por Zachary Dutton, Chien Liu, Cyrus H. Behroozi, Brian Busch, Christopher Slowe y Michael Budde, así como a Stephen E. Harris, de la Universidad de Stanford.

PREGUNTAS Y RESPUESTAS: LA VELOCIDAD DE LA LUZ

Cuando se menciona la velocidad de la luz, siempre surgen dudas. Aquí se intenta aclarar algunas de ellas.

Las partículas cargadas que viajan más deprisa que la luz emiten radiación de Cerenkov. ¿Cómo es posible que nada se desplace más deprisa que la luz? ¿No se supone que su velocidad es el límite universal?

Existe gran confusión sobre la velocidad de la luz, expresión que tiene dos significados bastante distintos. Uno de ellos es "la velocidad a la que se desplaza la luz", velocidad que varía dependiendo del medio: es más rápida en el vacío, algo más lenta en el aire y dos tercios menor en el vidrio.

El segundo significado, el límite universal de velocidad, tiene el nombre más preciso de "la velocidad de la luz en el vacío" y tiene su propio símbolo: *c*. Pero la velocidad a la cual se desplaza la luz a través del vacío no es más que una de las manifestaciones de *c*. Llamamos *c* a la velocidad de la luz sólo por la casualidad histórica de que el primer encuentro que la ciencia tuvo con *c* fue en su papel de velocidad de la luz y de otras ondas electromagnéticas. Hay quienes propugnan que se la denomine "constante de Einstein".

Cuando se distinguen estas dos velocidades de la luz, las condiciones para la radiación de Cerenkov no son ningún problema. La luz viaja aproximadamente a 0,75 *c* en el agua. Las partículas pueden desplazarse por el agua más deprisa sin romper el límite de velocidad de 1,00 *c*.

¿Cuál es la velocidad de la luz?

c es exactamente 299.792.458 metros por segundo.

¿Exactamente? ¿Cómo puede ser un número entero?

Entra en juego una manipulación metrológica: actualmente se define el metro como la distancia que viaja la luz en el vacío en 1/299.792.458 de segundo. Los metrólogos definen el metro de esa forma porque haciéndolo así resulta una cantidad que es más exacta que con otras alternativas.

De todos modos, ¿por qué es *c* un límite de velocidad?

Esto se relaciona con la importancia real de *c*: define una relación fundamental entre espacio y tiempo. Una distancia de 299.792.458 metros equivale a un intervalo de tiempo de un segundo. Este es uno de los mensajes de la teoría de la relatividad especial de Einstein: espacio y tiempo son aspectos diferentes de una única entidad, llamada espaciotiempo.

Si uno viaja más deprisa que *c* en el espaciotiempo, se pueden imaginar formas de viajar hacia el pasado. El viaje en el tiempo desencadenaría paradojas lógicas de causa y efecto, lo que convence a muchos físicos de que ese viaje (e incluso la transmisión de información con mayor rapidez que *c*) tiene que ser imposible. También hay otras razones, la menor de las cuales no es la falta de pruebas de que ningún objeto físico o señal se mueva más deprisa que *c*.

Graham P. Collins

A través del gas, a oscuras

Con el frente del pulso de luz desplazándose tan lentamente mientras su cola sigue yendo a toda velocidad por el aire, el pulso se encoge en el gas como un acordeón. Su longitud se comprime veinte millones de veces hasta un mero veinteavo de milímetro. Se podría esperar que la intensidad de la luz aumentase enormemente, ya que la misma cantidad de energía está ahora comprimida en un espacio menor. Pero no se produce tal amplificación, sino que la onda electromagnética conserva la misma intensidad. Para expresarlo de otro modo digamos que mientras va por el aire el pulso contiene 50.000 fotones, mientras que el pulso retardado contiene 1/400 de fotón (de nuevo el factor de veinte millones). ¿Qué ha pasado con todos los demás fotones y con su energía? Parte de esa energía va a los átomos de sodio, pero la mayor parte de ella pasa al haz de láser de acoplamiento. Esta transferencia de energía puede observarse directamente si se registra la intensidad del láser de acoplamiento.

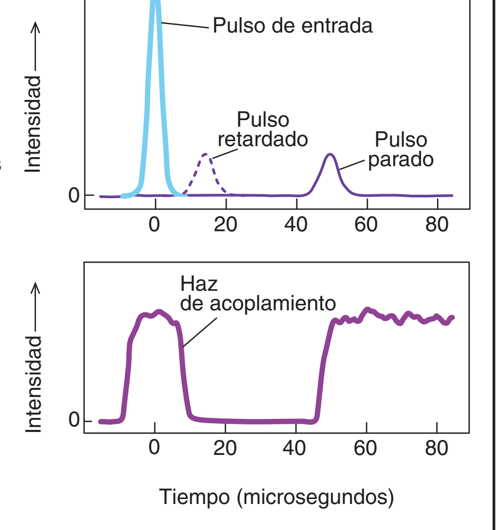
Estas transferencias de energía también cambian los estados de los átomos de sodio por donde va pasando el pulso. Los átomos de la parte que se enfrenta al pulso cambian su estado original 1 por una superposición de estados 1 y 2, el estado oscuro comentado anteriormente. El estado oscuro tiene la mayor proporción de estado 2 en la parte central y más intensa del pulso. Conforme la parte trasera del pulso retardado abandona una zona de átomos, éstos retornan hacia el estado 1. La estructura de estados oscuros de la nube imita la forma del pulso comprimido de luz retardada y lo acompaña a través del gas como una onda. Cuando esta onda y el pulso de luz alcanzan el extremo de la nube de gas, el pulso de luz reabsorbe la energía de los átomos y del haz de acoplamiento, para proseguir apresuradamente su marcha a través del aire a su habitual velocidad de 300.000 kilómetros por segundo y con su longitud original de un kilómetro.

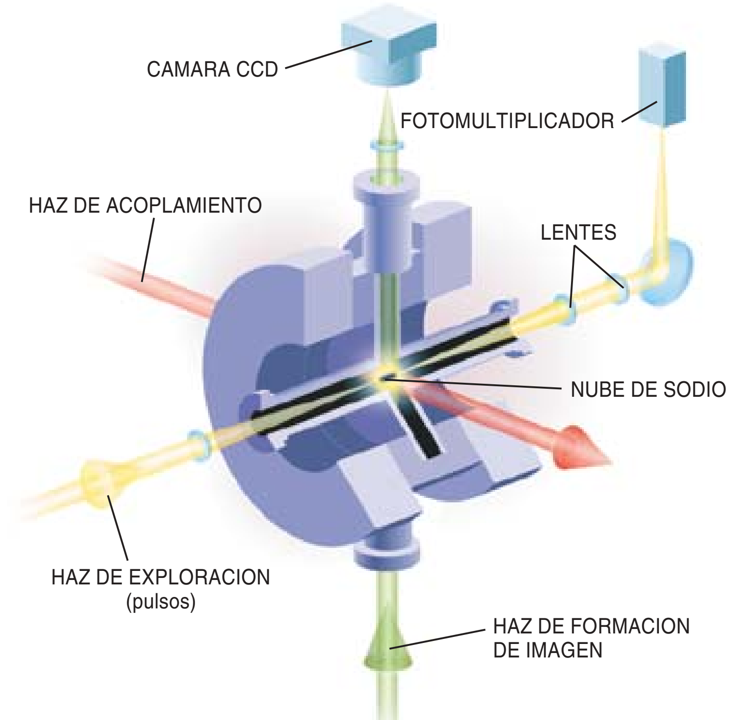
La velocidad de la luz retardada depende de varios parámetros. Algunos de ellos se fijan una vez que escogemos nuestra especie atómica y los estados excitados que se van a usar, pero dos de las variables están bajo nuestro control: la densidad de la nube de átomos y la intensidad del haz de láser de acoplamiento. Aumentando la densidad de la nube disminuye la velocidad de la luz, pero esto sólo se puede llevar hasta cierto límite, en parte porque las nubes muy densas dejan escapar átomos hacia el exterior de la trampa magnética con demasiada rapidez. La velocidad del pulso también se reduce si el haz de láser de acoplamiento es más débil. Por supuesto, si el láser de acoplamiento es demasiado débil, la nube no será transparente y absorberá el pulso. Pero hay un truco que permite llegar hasta el límite de retardo sin que la absorción determine la pérdida del pulso, consistente en apagar el haz de láser de acoplamiento mientras el pulso comprimido y retardado está en medio del gas.

MANUAL PARA DETENER LA LUZ

MONTAJE EXPERIMENTAL

Los elementos básicos del experimento de luz retardada son tres haces de láser y una nube ultrafría de átomos de sodio en condiciones de alto vacío (tamaño exagerado). El haz de acoplamiento actúa sobre la nube, haciéndola transparente para un pulso del haz de exploración, aunque con una consistencia de "melaza". Un fotomultiplicador mide el tiempo de llegada del pulso con una precisión superior a un microsegundo. Entonces el haz de formación de imagen mide la longitud de la nube proyectando su sombra sobre una cámara fotográfica. El resto de aparatos, como el sistema que suministra una nueva nube ultrafría para cada pulso, los electroimanes cuyo campo combinado mantiene a los átomos en su sitio y muchos detalles adicionales de la óptica, no se detallan en la figura.





COMO SE MANIFIESTA LA LUZ DETENIDA

La determinación exacta de los tiempos de los pulsos de luz revela su retardo y su detención. Si no está presente la nube de átomos, el pulso de entrada se detecta en tiempo "cero" (*arriba*). El retardo por una nube se manifiesta por el retraso del pulso (curva punteada). Para pararlo se apaga el haz de acoplamiento mientras el pulso está dentro de la nube (*abajo*). El tiempo que el pulso está parado —en este caso, 35 microsegundos aproximadamente— se añade a su retraso. Los pulsos retardados pierden intensidad porque la nube no es perfectamente transparente. Los pulsos detenidos también se degradan lentamente, debido a la difusión y a la colisión de los átomos que los mantienen.

El pulso de luz responde con una parada en seco y se extingue, pero la información que había en la luz no se pierde. Esa información ya estaba grabada en los estados de los átomos y, cuando el pulso se detiene, esa huella queda simplemente inmovilizada en el sitio en que se encuentra, de forma semejante a un sonido grabado en una cinta magnética. El proceso de detención no comprime la estructura de estados porque toda se retarda al unísono, a diferencia de la etapa anterior, cuando el pulso entraba gradualmente en el gas.

La estructura inmovilizada grabada en los átomos contiene toda la información sobre el pulso original de luz. Por ejemplo, la proporción de estados 1 y 2 se relaciona con la intensidad del pulso en cada posición. Lo que efectivamente se tiene es un holograma del pulso escrito en los átomos del gas. Este holograma se lee encendiendo de nuevo el láser de acoplamiento. El pulso de luz reaparece y se pone otra vez en marcha lentamente junto con la onda de estados atómicos, como por arte de magia y como si nada hubiese pasado.

Se puede almacenar la luz durante tiempos de hasta un milisegundo, lo que es suficiente para que un pulso se desplace 300 kilómetros en el aire. El pulso se degrada en proporción al tiempo que esté almacenado, pues los átomos del gas siguen moviéndose, haciendo que la estructura de estados oscuros se difumine lentamente. También las colisiones entre los átomos pueden romper los estados de superposición. El pulso que se obtiene a la salida después de un milisegundo es claramente más débil que el original. Pueden emplearse algunos otros trucos. Por ejemplo, si el haz de acoplamiento se activa con mayor intensidad, el pulso de salida será más brillante pero más corto. Si se enciende y se apaga rápidamente el haz de acoplamiento varias veces, el pulso se regenera en varios trozos. Estas manipulaciones demuestran el grado de control que se tiene sobre los pulsos almacenados y pueden ser útiles para futuros experimentos y aplicaciones.

Agujeros negros y ordenadores

El proceso de retardar y parar la luz permite muchos experimentos interesantes. Por ejemplo, se podría enviar un pulso de luz a través de un condensado de Bose-Einstein con la velocidad de la luz ajustada para igualar la velocidad del sonido en el condensado (aproximadamente un centímetro por segundo). Los átomos del condensado deberían deslizarse junto con el pulso de luz, poniendo en marcha oscilaciones de todo el condensado. Esta sería una forma completamente nueva de estudiar las propiedades superfluidas de los condensados. Como también se los puede producir en forma de vórtice, con el gas girando como el agua que se va por el sumidero, un pulso de luz retardada que se desplazase a través de uno de ellos se vería arrastrado junto con el gas, lo que sería muy parecido a un fenómeno que se supone que ocurre cerca de los agujeros negros. Con la luz retardada pueden estudiarse en el laboratorio éste y algunos otros fenómenos de los agujeros negros.

La luz retardada también permite una nueva clase de óptica no lineal, la que se produce cuando un haz de láser altera las propiedades de otro haz. La óptica no lineal es un inmenso campo de investigación, tanto fundamental como aplicada, que abarca desde la formación de imágenes a las telecomunicaciones. Generalmente se necesitan haces sumamente intensos para lograr efectos ópticos no lineales, pero con la luz retardada se pueden producir los mismos fenómenos con un número muy pequeño de fotones. Estos efectos podrían ser útiles para crear interruptores ópticos ultrasensibles.

Otra aplicación de la luz retardada e inmovilizada podrían ser los ordenadores cuánticos, en los que los consabidos unos y ceros son sustituidos por superposiciones cuánticas de unos y ceros, llamadas qubit. Si se pudieran construir estos ordenadores, podrían solucionar ciertos problemas en los que un ordenador corriente tardaría un tiempo enormemente largo. Existen dos amplias categorías de qubit: aquellos que permanecen en un sitio e influyen sobre otro fácilmente (como son los estados cuánticos de los átomos) y los que se desplazan rápidamente de un lugar a otro (fotones), pero que es difícil que se relacionen en la forma requerida por un ordenador cuántico. El sistema de luz retardada, con la transformación de fotones en movimiento en estructuras estacionarias de estados oscuros y viceversa, proporciona un sólido método para pasar de uno a otro tipo de qubit, un proceso que podría ser esencial para la construcción de ordenadores cuánticos a gran escala. Puede imaginarse la grabación de dos pulsos en la misma nube de átomos, permitiendo que los átomos se influyan recíprocamente y leyendo a continuación el resultado en forma de nuevos pulsos de luz de salida.

Aunque la luz inmovilizada termine no siendo el componente más conveniente ni el más versátil para la construcción de un ordenador cuántico, ha abierto perspectivas de investigación más que suficientes para que nosotros y muchos otros investigadores nos mantengamos ocupados durante muchas sesiones nocturnas en los años venideros.

Bibliografía complementaria

ELECTROMAGNETICALLY INDUCED TRANSPARENCY. Stephen E. Harris en *Physics Today*, vol. 50, n.º 7, páginas 36-42; julio 1997.

EL CONDENSADO DE BOSE-EINSTEIN. Eric A. Cornell y Carl E. Wieman en *Investigación y Ciencia*, n.º 260, páginas 6-12; mayo 1998.

LIGHT SPEED REDUCTION TO 17 METRES PER SECOND IN AN ULTRACOLD ATOMIC GAS. Lene Vestergaard Hau, S. E. Harris, Zachary Dutton y Cyrus H. Behroozi en *Nature*, vol. 397, páginas 594-598; 18 de febrero, 1999.

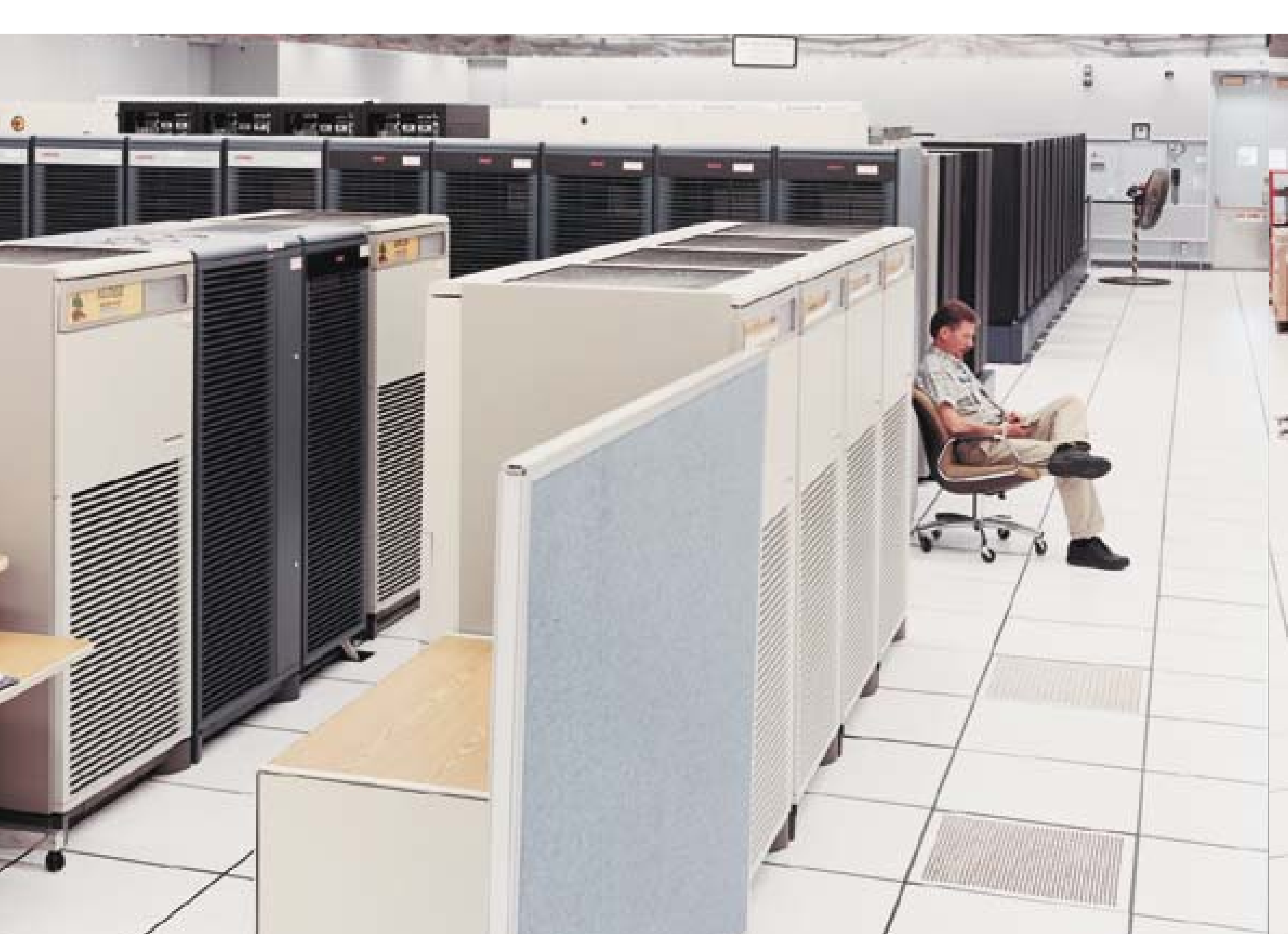
OBSERVATION OF COHERENT OPTICAL INFORMATION STORAGE IN AN ATOMIC MEDIUM USING HALTED LIGHT PULSES. Chien Liu, Zachary Dutton, Cyrus H. Behroozi y Lene Vestergaard Hau en *Nature*, vol. 409, páginas 490-493; 25 de enero, 2001.

La construcción de un hiperordenador

La resolución de los principales problemas de la humanidad requiere supercomputadoras bastante más veloces que las actuales

Thomas Sterling

Las supercomputadoras más veloces de que hoy se dispone son demasiado lentas para la ciencia del mañana. A pesar del continuo avance realizado en el campo de las comunicaciones y del procesamiento de información, muchos de los desafíos computacionales que resultan decisivos para el futuro de la salud, el bienestar, la seguridad y la prosperidad de la humanidad no son abordables ni con los más rápidos ordenadores actuales. La realización de avances importantes en campos imprescindibles, como la climatología, la medicina, la biología, la fusión controlada, la defensa, la nanotécnica, la ingeniería avanzada y el comercio, dependen del desarrollo de máquinas mil veces más rápidas que las supercomputadoras más grandes de hoy en día (*véase*



el recuadro "Tareas que requieren hiperordenadores").

La posibilidad de encontrar soluciones a problemas de tal complejidad viene condicionada por la capacidad que se tenga para reproducir y modelizar su comportamiento con la mayor fiabilidad y certeza posibles, lo que en muchos casos ha de hacerse además durante largos períodos de estudio. Tales prestaciones superan con mucho la capacidad de las supercomputadoras actuales, que pueden llegar a realizar varios billones de operaciones de coma flotante por segundo (teraflop, $1 \cdot 10^{12}$). El mayor de los sistemas existentes en la actualidad tardaría cien años en calcular el plegado de proteínas (una aplicación muy deseada). Para realizar tareas de este tipo se necesitan sistemas de hipercomputación que alcancen velocidades de petaflop ($1 \cdot 10^{15}$), es decir, más de mil billones de operaciones (cálculos aritméticos) de coma flotante por segundo.

Las computadoras actuales no sólo son demasiado lentas, sino también demasiado caras. El sistema Blue ASCI (Accelerated Strategic Computer Initiative) de tres teraflop, que se utiliza para la supervisión de las reservas nucleares de los Estados Unidos, cuesta aproximadamente 120 millones de dólares, lo que supone una relación precio/prestaciones de 40 dólares por megaflop (un millón de flop, $1 \cdot 10^{6}$), que es más de diez veces peor que la de un buen ordenador personal. Los ordenadores de primera categoría imponen además costes indirectos. Los costes relacionados con la electricidad necesaria para mantenerlos en funcionamiento pueden superar el millón de dólares anuales. Habilitar las instalaciones requeridas por su gran tamaño acarrea costes adicionales. Y la contratación de técnicos punteros que elaboren los complicados programas también aumenta los costes.

A pesar de sus sorprendentes velocidades de proceso, estos sistemas no hacen un uso adecuado de los recursos de computación con los que cuentan, lo que origina niveles de rendimiento muy bajos. No es raro que sean del veinticinco por ciento, llegándose al uno por ciento en determinadas aplicaciones.

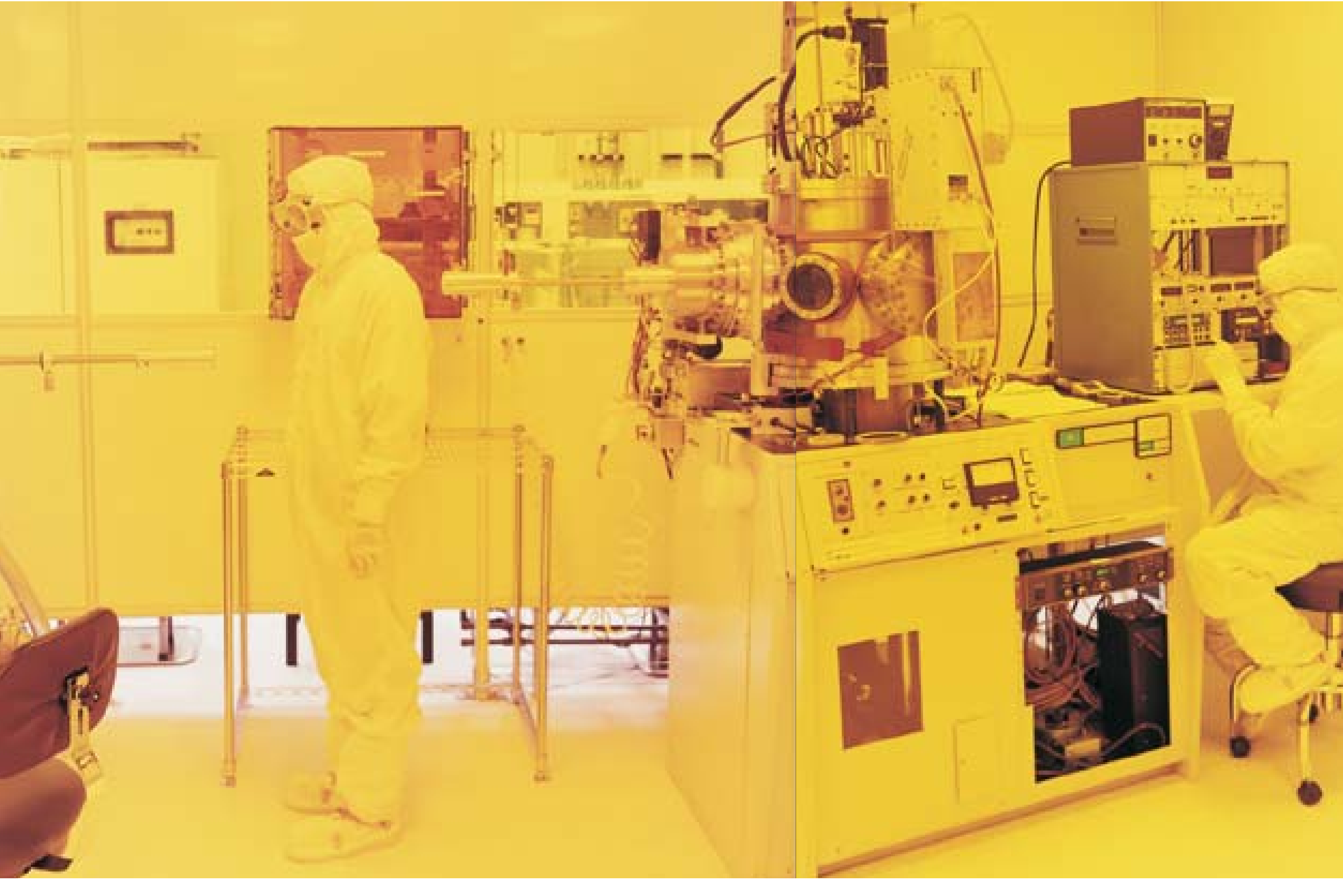
El sistema de Técnica Híbrida de Múltiples Hilos (HTMT) es un nuevo tipo de computadora cuyas prestaciones son cien veces mejores que las de los sistemas actuales de primera línea, a pesar de lo cual sus requisitos de coste, de espacio y de potencia consumida son los mismos. Perfeccionamientos posteriores podrían llevar a esta técnica más allá de los mil billones de flop, a la zona por encima de los petaflop, lo que supondría incrementar en más de mil veces el rendimiento de los mejores sistemas actuales. Se ha formado un grupo interdisciplinar de investigadores provenientes de diversas instituciones para la consecución de este objetivo, grupo que ha ideado un ordenador cuya estructura integra las técnicas más avanzadas de comunicaciones, de memoria y de procesamiento, aprovechando al máximo sus virtudes y contrarrestando sus limitaciones. Los elementos básicos del HTMT se han desarrollado con el apoyo financiero de diversos organismos estadounidenses: NASA, Agencia Nacional de Seguridad, Fundación Nacional de Ciencia y la Agencia de Investigación Avanzada de Proyectos de Defensa. Cuando se entre en la fase de fabricación se requerirá más financiación pública.

Aunque parezca irónico, es el éxito mismo de la técnica de los ordenadores el que hace evidentes sus limitaciones. Con los ordenadores personales que había a finales de los años setenta del siglo pasado lo más que podía hacerse era ejecutar juegos muy sencillos, como el Pong. Un sistema capaz de resolver entonces un problema científico de entidad con un rendimiento de varios megaflop costaba por encima de los 40 millones de dólares. Un PC actual de menos de 2000 euro los supera.

El sector de los superordenadores ha solido mejorar el rendimiento del proceso mediante la combinación de técnicas y de estructuras muy avanzadas en proyectos elaborados para problemas específicos, con la consecuencia indeseable de los enormes precios. Los costes desorbitados y los larguísimos períodos de desarrollo han mantenido el mercado relativamen-



1. ORDENADOR RAPIDISIMO. El Blue ASCI (Accelerated Strategic Computer Initiative) consigue velocidades de tres teraflop ($3 \cdot 10^{12}$). Se encuentra en el Lawrence Livermore National Laboratory y se utiliza para el mantenimiento del arsenal de armas nucleares de EE.UU.



2. CIRCUITOS INTEGRADOS MUY RAPIDOS. Los ingenieros del TRW Space Park de Redondo Beach, California, hacen uso de máquinas especializadas para la deposición de capas superconductoras sobre obleas de silicio, como parte de la fabricación de prototipos de procesadores superconductores.

te estancado, mientras que otros segmentos de la industria informática han crecido de manera explosiva. Los enormes costes han encarecido el precio final y han limitado el mercado potencial y la inversión de las empresas, dando lugar a una espiral que ha conducido a la consabida muerte comercial del producto.

Tampoco se ha conseguido mucho cuando se ha intentado buscar alternativas. Entre ellas están las configuraciones vectoriales específicas, que permiten operar con eficacia sobre una serie de números utilizando accesos preordenados a la memoria y unidades funcionales aritméticas, y los sistemas paralelos constituidos por la cooperación de gran número de microprocesadores. Los costes de estos sistemas han seguido siendo grandes y la eficacia operacional de muchas aplicaciones se ha visto resentida. Se han construido durante los dos o tres últimos años ordenadores de propósito general en los que se hace gran uso del paralelismo y con los que se han conseguido velocidades superiores al teraflop, aunque su escaso rendimiento dificulta su aplicación a problemas del mundo real. El resultado es que la única solución que se considera económicamente viable es la arquitectura cooperativa, la agrupación de subsistemas de cómputo estándar en forma de red. Estos sistemas requieren poco desarrollo adicional, a pesar de las dificultades de programación y de las demoras de la comunicación que son inherentes al uso de sistemas agrupados.

Se viene investigando en nuevos sistemas informáticos capaces de procesar petaflop desde hace más de un lustro. Se ha atacado el problema de la velocidad desde todos los frentes, explorando las diversas rutas ofrecidas por la técnica. Es posible que se alcance el objetivo en el decenio presente si se aplica el esfuerzo de investigación y de desarrollo requerido (*véase el recuadro* "Cinco caminos hacia el procesamiento ultrarrápido"). Aunque cada método tenga sus virtudes y sus defectos, uno de los mas difundidos es el modelo HTMT.

El HTMT conjuga diversas técnicas punteras en un único sistema optimizado y flexible. Pretende conseguir prestaciones superiores a los petaflop utilizando procesadores muy veloces, enlaces de comunicaciones de gran capacidad, memorias de almacenamiento muy compactas y otras técnicas que están a punto de cuajar, formando con ellos una estructura dinámica y adaptativa.

Cualquiera que sea el camino elegido hay que afrontar tres dificultades. En primer lugar ha de encontrarse la forma de conjuntar los suficientes recursos de procesamiento, almacenamiento y comu-

nicaciones para alcanzar los deseados máximos de proceso dentro de las limitaciones prácticas de tamaño, de coste y de consumo de energía. La segunda tarea es la consecución de un rendimiento operativo adecuado a pesar de los factores de degradación habituales, entre los que se cuentan la latencia propia del sistema (demoras internas), los conflictos en la utilización de recursos compartidos, como la memoria principal y los canales de comunicación, la disminución genérica de capacidad derivada de las operaciones de manejo y coordinación de las tareas conflictivas y de los recursos paralelos, así como el desaprovechamiento de la capacidad de cómputo provocado por el insuficiente paralelismo de las tareas o por la distribución inadecuada del trabajo. El tercer objetivo consiste en la búsqueda de métodos que mejoren la manejabilidad del sistema, una medida bastante arbitraria que abarca aspectos como las posibilidades que tenga de aplicación general, su facilidad de programación o su disponibilidad.

Procesadores superconductores

Los sistemas lógicos digitales de los diez últimos años han estado dominados por los procesadores CMOS (semiconductor complementario de oxido metálico). Esta técnica ha proporcionado los mejores rendimientos con consumos de potencia cada vez menores, mientras que las densidades de componentes se incrementaban exponencialmente. Pero no es la más rápida del mundo. Aspira a este título otra completamente diferente, que aplica principios físicos de un nuevo tipo: la lógica superconductora.

La superconducción se descubrió a principios del siglo XX y consiste en la facultad de conducir la electricidad sin resistencia, fenómeno que presentan determinadas sustancias a temperaturas criogénicas. Un bucle de cable superconductor mantendría indefinidamente una corriente eléctrica en principio. Mayor importancia tiene que los componentes y los circuitos electrónicos superconductores reales presenten comportamientos mecánico-cuánticos. Ha-

Tareas que requieren hiperordenadores

Gran parte de los problemas científicos con trascendencia política y social están a la espera de soluciones cuyo procesamiento requiere ordenadores capaces de ejecutar más de mil billones de operaciones de coma flotante por segundo (petaflop, 10^{15} flop).

Conocimiento del clima

La capacidad de prever los cambios climáticos a corto y a largo plazo es de vital importancia para los habitantes de la Tierra. Los ordenadores con velocidades de petaflop integrarían primero la gran cantidad de información obtenida vía satélite y la representarían en planos detallados. Esa información se podría utilizar luego para simular y modelar el comportamiento caótico de los elementos del sistema climático, lo que daría lugar a predicciones muy precisas.

Fusión controlada

La fusión termonuclear, que pretende ser la solución a los problemas energéticos del mundo, además de poder utilizarse como carburante para cohetes, sigue siendo una posibilidad remota debido a su gran complejidad. Mediante ordenadores con velocidades de petaflop se podrían simular las relaciones térmicas, electromagnéticas y nucleares de un gran número de partículas en un medio magnético dinámico, lo que ayudaría a la fabricación de reactores de fusión viables.

Medicina y biología

Una mayor velocidad de proceso puede suponer una valiosísima arma en la lucha de la medicina contra las enfermedades en constante evolución. Un análisis molecular, por ejemplo el análisis del plegado de proteínas, recortaría los plazos de fabricación de los medicamentos.

Agricultura

La computación rápida también permitiría el desarrollo de la ingeniería genética, lo que podría dar lugar a nuevas cosechas y a que se pudiera alimentar a la creciente población mundial, así como a resolver los complejos problemas relacionados con la ecología mundial.

Defensa

A raíz de la prohibición de las pruebas de armas nucleares surge la necesidad de modelar el comportamiento de estos sistemas para mantener la disponibilidad de armas estratégicas y del arsenal nuclear. También permitiría el desciframiento de los cada vez más complejos códigos secretos.

Comercio y finanzas

La recopilación de información correspondiente al mundo empresarial y de las finanzas permitiría simulaciones más precisas de los sistemas comerciales.

Nanotécnica

Al reducirse el tamaño de los componentes electrónicos hasta la escala atómica, a la cual la mecánica cuántica adquiere importancia, los proyectistas no pueden representarlos con los parámetros físicos habituales.

Ingeniería de punta

La capacidad de procesado ultrarrápido será necesaria para la simulación del comportamiento de nuevos materiales y de sus compuestos a escala microscópica. El proyecto de aviones y de otros sistemas complejos se verá igualmente beneficiado por los perfeccionamientos de la capacidad de elaborar modelos detallados.

Astronomía

La elaboración de un modelo correcto de nuestra galaxia y de sus cien mil millones de estrellas requiere el uso de ordenadores de gran velocidad, que habrán de analizar las complejas interrelaciones del medio interestelar con las moléculas pesadas.

cia 1960 se desarrolló un dispositivo de conmutación no lineal basado en la superconducción, al que se denominó unión de Josephson, que demostró operar con velocidades excepcionales.

El proyecto HTMT de hipercomputación empleará procesadores lógicos superconductores de gran velocidad basados en la unión de Josephson. Hay una técnica de almacenamiento de información, llamada técnica rápida de flujo cuántico único (*rapid single-flux quantum*, RSFQ), que la conserva en forma de pequeños flujos cuánticos circulantes en bucles de material semiconductor (mediante niveles de corriente continua). Los bucles, a los que se denomina elementos superconductores de interferencia cuántica, o SQUID (*superconducting quantum interference device*), son mecanismos sencillos ideados originalmente como detectores y que están compuestos por dos uniones de Josephson conectadas por medio de un inductor, que tiene forma de solenoide. Si se inyecta una corriente en un bucle cuyas dos uniones Josephson estén activas, se mantendrá indefinidamente. Los SQUID presentan además la ventaja de tener varios modos diferentes de operación: pueden no tener corriente alguna, pueden mantener una corriente básica o bien tener una corriente que sea múltiplo entero de la corriente básica, sin intermedios. Esta notable propiedad deriva de los efectos mecánico-cuánticos. Las puertas lógicas RSFQ utilizan pulsos discretos de corriente (flujos) para representar los ceros y los unos del código digital, en vez de utilizar distintos niveles de voltaje. Pueden trabajar a más de 770 gigahertz a la temperatura de cuatro grados Kelvin, que es la velocidad de proceso más rápida jamás conseguida por una puerta aislada y unas cien veces más rápida que la de la familia CMOS corriente.

La técnica RSFQ permitirá que el sistema de computación híbrida

Cinco caminos hacia el procesamiento ultrarrápido

Una de las formas de conseguir una velocidad de proceso superior al petaflop (más de mil billones de operaciones de coma flotante por segundo) consiste en utilizar una arquitectura híbrida que combine varias técnicas que se encuentran todavía en fase experimental. A continuación se muestran otras cinco posibilidades para la consecución del mismo objetivo.

NOMBRE	METODO	EJEMPLO	APLICACIONES PROPICIAS
1 ARQUITECTURA DE PROPOSITO ESPECIFICO O ANILLO SISTOLICO	Los componentes físicos y los programas se organizan de manera específica para resolver un problema determinado. Funciona en paralelo con líneas de datos de alta velocidad para acelerar el cómputo	Proyecto Grape (Universidad de Tokio)	Cálculos multicuerpo, simulación estelar, bioinformática
2 AUTOMATA CELULAR	Máquina de estados finitos en la cual un gran número de celdas de computación, dispuestas en matrices de dos o tres dimensiones, realizan una operación en cada ciclo de reloj. La acción realizada por cada una de las celdas depende de su estado inicial y del estado de las celdas que la rodean	Nunca se ha llevado a la práctica por completo	Dinámica de fluidos computacional, simulación de difusión
3 ARQUITECTURA DE INTEGRACION DE PROCESADOR EN MEMORIA (PIM)	Cada pastilla cuenta con una gran capacidad de procesado y de almacenamiento. La lógica del sistema observa simultáneamente todos los bit que salen de la memoria dinámica de acceso aleatorio (DRAM). El número de accesos a memoria es elevado pero el reducido retardo en la transmisión de datos hace que no se deteriore el procesamiento durante cada ciclo	IRAM (Universidad de Berkeley, California); Blue Gene (IBM)	Procesado de imágenes, encriptado de datos, búsquedas rápidas en bases de datos, simulación del plegado de proteínas
4 BEOWULF O ARQUITECTURA COOPERATIVA	Se hace uso de un medio de comunicación de gran velocidad para interconectar un gran número de procesadores de coste reducido (cada uno es un sistema parcial en una pastilla independiente), formando un anillo de gran densidad	Programación GigAssembler (Consorcio Internacional de Secuenciación del Genoma Humano)	Gran diversidad de problemas, descifrado del genoma humano
5 COMPUTACION DISTRIBUIDA O ARQUITECTURAS DE MEGACOMPUTACION	Se aprovechan los ciclos desaprovechados de los aproximadamente 500 millones de ordenadores personales conectados a Internet. Presenta la desventaja del poco rendimiento de las comunicaciones	SETI@home (Proyecto Serendip)	Problemas paralelos de gran tamaño, como por ejemplo la simulación de Monte Carlo y la supervisión de Internet

El autor

THOMAS STERLING colabora con el grupo de computación de gran rendimiento del laboratorio de propulsión a reacción de la NASA, en el que trabaja como investigador jefe, y con el centro de investigación computacional avanzada del Instituto de Técnica de California, donde es profesor asociado. Durante los últimos veinte años ha realizado tareas de investigación relativas a los elementos físicos para el procesamiento paralelo y a sistemas de programación para computación de alto rendimiento. Desde 1994 ha dirigido la iniciativa americana para el desarrollo de ordenadores con capacidad de operar por encima de los petaflop. Dirige el proyecto de investigación de la arquitectura multihilo de técnica híbrida.

funcione a entre 100 y 200 gigaflop (mil millones de flop, $1 \cdot 10^9$) por procesador, en comparación con algunos gigaflop que se consiguen con los procesadores CMOS habituales. La naturaleza minúscula y compacta de los flujos cuánticos magnéticos de los sistemas RSFQ reduce además las interferencias y el consumo de electricidad en varios órdenes de magnitud. Es una técnica que está madurando rápidamente y que reduce las exigencias de paralelismo, de coste, de potencia y de tamaño del sistema.

Mejora del rendimiento

La técnica HTMT persigue la utilización eficaz de la potencia de los procesadores ultrarrápidos, que deberían estar haciendo cálculos la mayor parte del tiempo. Los planteamientos tradicionales, como la arquitectura cooperativa, requieren nodos de cómputo cuyo tamaño sea proporcional al de la dificultad de la tarea que tienen que desarrollar. No es infrecuente que un nodo de un sistema ordinario tenga que esperar mientras se atiende a otro nodo. Si no se consigue una distribución perfecta de la carga de trabajo, habrá nodos que seguirán ejecutando procesos mientras que otros, los que hayan acabado sus tareas, permanecerán inactivos. Aunque se apliquen métodos informáticos de distribución equilibrada de cargas, estos procesos constituyen una tarea adicional que reduce el rendimiento del sistema.

HTMT supone una revolución en las relaciones entre el sistema de proceso y el de memoria, lo que le diferencia de todos sus predecesores. Los procesadores de los sistemas más comunes gestionan y manipulan un sistema de memoria "tonta", mientras que es la memoria "lista" del HTMT quien gestiona los procesadores. HTMT y otros sistemas de cómputo paralelos muy acoplados evalúan continuamente la carga de los elementos procesadores y toman decisiones instantáneas sobre qué parte de la máquina tiene que ejecutar cada una de las tareas. Los procesadores funcionan así con sus registros propios y con la memoria intermedia de gran velocidad, evitando tener que sumergirse en las profundidades del sistema. El resultado es que se reducen los problemas de latencia. Los procesadores no invierten tiempo en la gestión de los recursos de almacenamiento, que serían ciclos de proceso desaprovechados, puros "gastos generales". Estas decisiones de intendencia las toman los procesadores baratos de la memoria.

El proyecto HTMT aborda el problema de la latencia de dos maneras. En primer lugar se utiliza un esquema de administración dinámico y adaptativo, basado en una estructura multihilo que permite conmutar entre diferentes secuencias de instrucciones en un mismo ciclo. Mientras que la mayoría de los ordenadores trabajan con una única secuencia de instrucciones, el HTMT podrá trabajar con múltiples secuencias. Sus procesadores hacen uso de comunicaciones superpuestas, lo que les permite atender multitud de peticiones de manera simultánea. Como ejemplo consideremos que un procesador superconductor necesitase cargar información contenida en una memoria intermedia o en un tampón muy rápido, trámite que requiriese muchos ciclos de diez picosegundos. Dado que es el sistema de la memoria el encargado de atender este tipo de peticiones, el procesador puede pasar a otra secuencia de datos que contenga operaciones que puedan realizarse de manera inmediata.

El segundo método utilizado para bregar con la cuestión de la latencia es el empleo de la técnica que integra en la memoria pequeños procesadores secundarios o a tiempo parcial (PIM). Los progresos experimentados por los procesos de fabricación permitieron hace algunos años que se integraran en una misma oblea elementos de memoria dinámica de acceso aleatorio (DRAM) y de lógica CMOS, lo que aumentaba su integración. Estos componentes son baratos y manejan la información de la memoria, contribuyendo a resolver el problema de los gastos generales y permitiendo que los procesadores se dediquen a tareas importantes. La técnica PIM puede ocuparse también de tareas que requieran mucho uso de memoria, como son la obtención de datos en diferentes puntos y su condensación en un único objeto o su inversa, el envío de la información a sus destinos correctos.

Puede que las técnicas y el plan organizativo que utiliza el sistema HTMT tengan carácter innovador, pero lo que es verdaderamente revolucionario es la forma en que se los utiliza y la forma en que se regula el cómputo. Se utilizarán nuevas técnicas de filtrado, en virtud de las cuales serán los procesadores PIM quienes decidan cuándo se debe comenzar una nueva tarea. Determinarán también en qué momento se debe enviar a la célere memoria intermedia situada cerca de los procesadores superconductores la información que ha de tratarse. Cuando se tenga que ejecutar una subrutina determinada, por ejemplo, ella y la información necesaria para su ejecución serán remitidas al procesador. Este método de previsión, que dispone con anticipación la información necesaria, evita grandes retardos cuando se accede a la memoria principal, al tiempo que libera a los procesadores rápidos de las tareas de intendencia generales.

Mayor facilidad de uso

La tercera gran dificultad de la computación ultrarrápida se refiere a la manejabilidad del sistema. Hay que conseguir que aumente el número de aplicaciones para las que sean útiles, que se facilite su programación y que mejore su disponibilidad o tiempo de servicio. El HTMT aborda estas cuestiones de varias maneras.

Cualquiera de los procesadores puede "ver" la totalidad de la memoria gracias a la utilización de un espacio de nombres global dentro de una estructura de computación con memoria compartida. Este método es más genérico que las técnicas clásicas de memoria distribuida o fragmentada, dado que permite que cualquier procesador acceda de manera eficaz a todos los datos sin que necesite echar mano de subprogramas de un procesador remoto para que le ayuden en la tarea. Se pueden realizar más actividades simultáneamente, acelerando su ejecución. Mediante la reasignación dinámica de procesos —en respuesta a los datos instantáneos de la ejecución— se pueden realizar diversas operaciones de manera más eficaz, lo que aumenta su carácter universal. Y como este planteamiento se aproxima al modo que tienen los informáticos de afrontar sus problemas, la programación del sistema se vuelve más intuitiva. Los programadores suelen tener que realizar la laboriosa y compleja tarea de determinar de antemano el método que utilizará un ordenador para tratar un problema. Pero el sistema HTMT toma gran parte de esas decisiones por su cuenta, facilitando así una de las mayores dificultades que se presentan a la hora de trabajar con ordenadores: su programación.

El sistema de cómputo híbrido proporcionará una mayor fiabilidad al utilizar subcomponentes a su vez más fiables, lo que permitirá alcanzar las mismas características con un número menor de elementos. Esta reducción de componentes provoca un aumento del tiempo medio entre fallos del conjunto, con lo que también aumenta considerablemente el tiempo de servicio.

Memoria de almacenamiento holográfico

Otro aspecto innovador del sistema HTMT será el uso de memoria holográfica de gran densidad y gran capacidad. Los laboratorios de investigación académicos y privados están estudiando la posibilidad de utilizarla como alternativa a la DRAM basada en semiconductores; debería aumentar la densidad de almacenamiento y reducir consumo y costes.

Los sistemas de almacenamiento holográfico utilizan materiales fotosensibles para acumular grandes bloques de datos. Hay dos formas distintas de tratar de conseguirlo, la de refracción de la luz y la de quema de agujeros espectrales. El almacenamiento por fotorrefracción consiste en que un frente de datos modula un rayo láser que interfiere con otro rayo láser de referencia en un pequeño bloque rectangular de material de almacenamiento, como pudiera ser el niobato de litio. El holograma resulta del efecto electro-óptico que tiene lugar cuando portadores de carga atrapados y distribuidos uniformemente son excitados por los rayos interferentes y dan lugar a campos eléctricos locales. Muchos son los bloques de datos que se pueden almacenar en el mismo material diana. Se les puede diferenciar variando el ángulo de incidencia o la longitud de onda del rayo láser. La técnica de quema de agujeros espectrales está basada en la respuesta no lineal que presente a los estímulos ópticos determinado material de almacenamiento. Los datos están representados por cambios en el espectro de absorción de un medio fotosensible. Se pueden almacenar muchos bit en un emplazamiento concreto.

Los métodos de fotorrefracción están mucho más avanzados, aunque puede que la técnica de quema espectral de agujeros depare una mayor densidad de almacenamiento a largo plazo. Los dispositivos utilizados habitualmente en la holografía requieren unos tiempos de acceso de varios milisegundos —aproximadamente lo mismo que un dispositivo de almacenamiento secundario corriente, como un CD-ROM o un disco duro—. Pero las técnicas avanzadas que hacen uso de aparatos láser sintonizables o de conjuntos de diodos láser, cada uno dispuesto con un ángulo diferente, pudieran llegar a conseguir tiempos de acceso de microsegundos. Aunque sean dos órdenes de magnitud superiores a los de la DRAM, el flujo de datos es igual o mayor y son unas cien veces más rápidos que las unidades de

Conceptos básicos de hipercomputación

Conflicto. Retardo generado por el intento de acceso de dos procesadores a un mismo recurso compartido.

Latencia. Retardo provocado por el tiempo que tarda en ser atendida una petición remota o en pasar un mensaje entre dos nodos de procesado.

Balanceado de carga. Distribución equitativa del trabajo de manera que todos los nodos de proceso estén ocupados durante la ejecución del programa.

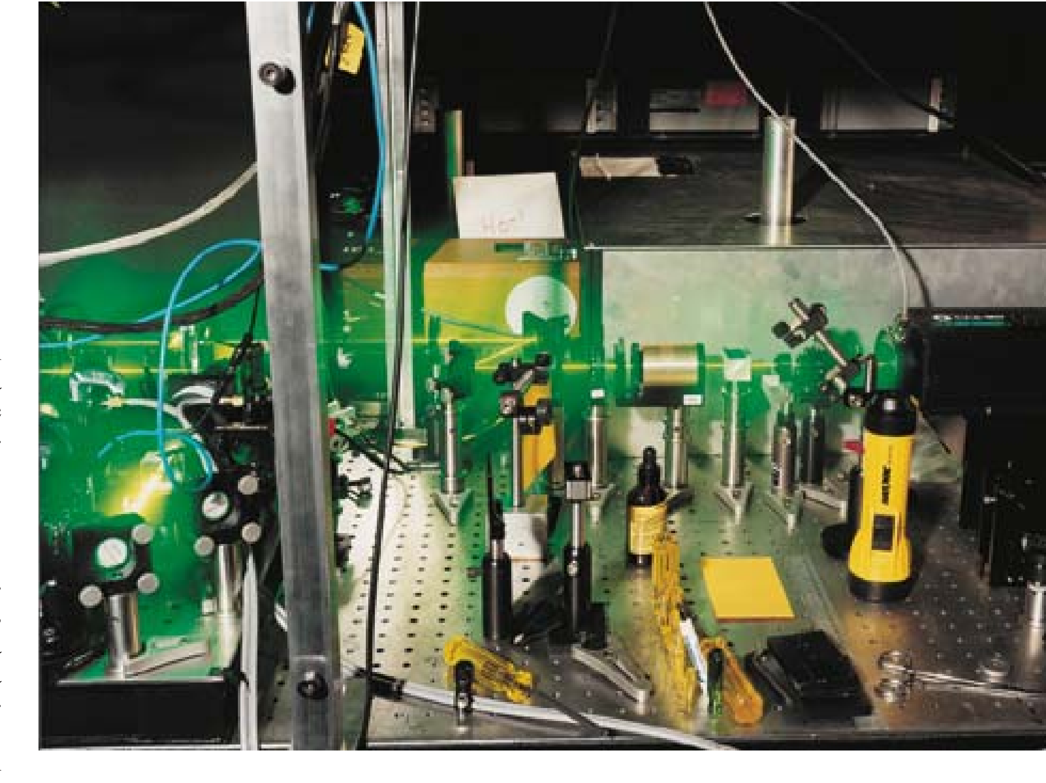
Burocracia. Tiempo dedicado a tareas no computacionales, como la administración logística de recursos paralelos y tareas concurrentes.

Percolación. Método de administración de tareas y de movimiento de datos sin incurrir en retardos provocados por burocracia, latencia, conflictos ni inanición.

Integración de procesador en memoria (PIM). Circuitos integrados que contienen en la misma pastilla tanto las células de memoria como los dispositivos lógicos.

Inanición. Desaprovechamiento de recursos provocado por un insuficiente paralelismo o por una mala distribución de la carga.

Multiplexado por división en longitud de onda (WDM). Método por el cual se puede incrementar el ancho de banda efectivo de un canal óptico haciendo uso de señales ópticas con diferentes longitudes de onda.



3. ALMACENAMIENTO DEFINITIVO. Un rayo láser atraviesa el sistema de almacenamiento holográfico en el Centro de Investigación Almaden de IBM, localizado en San José, California.

disco corrientes. Se espera que en el próximo decenio se alcance una capacidad de almacenamiento de 10 gigabit en bloques de unos cuantos centímetros cúbicos.

Comunicaciones ópticas

Para conectar los veloces procesadores superconductores a los sistemas de memoria holográfica de gran densidad a través de una red, el HTMT utilizará canales ópticos de datos de gran capacidad. En vez de utilizar electrones en cables metálicos, HTMT acelerará las comunicaciones utilizando fotones en cables de fibra óptica. Los cables metálicos permiten velocidades de hasta cientos de megabit por segundo; en el caso de utilizar pares diferenciales para entrada y salida (uno en sentido ascendente y el otro en sentido descendente) se alcanzan velocidades de algunos gigabit por segundo (gbps). Para proporcionar la totalidad del ancho de banda necesario en sistemas que trabajen en el ámbito de los petaflop se requeriría el uso de decenas de millones de cables. La señal digital luminosa de los emisores láser modulados puede transmitir a 10 gbps o más por canal en sistemas de comunicación ordinarios.

El empleo de multitud de longitudes de onda (colores) de la luz que transporta la información digital aumenta drásticamente el ancho de banda o capacidad del canal de la fibra óptica. El HTMT utilizará un sistema avanzado de comunicaciones ópticas denominado multiplexado por división en longitud de onda (WDM). Este sistema está destinado a proporcionar velocidades por canal cien veces superiores a las del mejor canal de un sistema de comunicaciones sobre cobre. El WDM permite la existencia de diferentes señales digitales, cada una de las cuales cuenta con su propia longitud de onda, de manera que puedan transmitirse a través del mismo medio. Durante los últimos años se ha aumentado a cien el número de longitudes de onda que se pueden transmitir a través de un único canal, número que seguirá creciendo durante los próximos años. Está previsto que las velocidades de conmutación alcancen a corto plazo valores próximos a los 50 megahertz, impulsadas por las mejoras en las técnicas de emisión, de recepción y de conmutación. Y todo apunta a que se alcancen velocidades del orden de un gigahertz, aunque tal cosa no se haya conseguido por el momento más que en entornos experimentales. Este rango de velocidades sería suficiente para gestionar el enorme flujo de datos asociado a los sistemas de computación del orden de los petaflop.

Esta próxima generación de hipercomputadoras pudiera suponer una valiosa herramienta para la exploración de los problemas más acuciantes del mundo, incluidos el calentamiento del planeta, las enfermedades epidémicas y las fuentes de energía ecológicas. El Comité Asesor de Técnicas de la Información del Presidente norteamericano recomendó en 1999 que se financiase este tipo de proyectos. Los grupos de investigación han demostrado que las técnicas HTMT pueden ser el camino para la computación por encima de los petaflop. Y sólo falta la financiación adecuada para convertirlos en realidad.

Bibliografía complementaria

CHALLENGES OF FUTURE HIGH-END COMPUTING. David H. Bailey en *High Performance Computer Systems and Applications*. Dirigido por Jonathan Schaeffer. Kluwer Academic Publishers, 1998. Accesible en www.nersc.gov/~dhbailey/dhbpapers/future.pdf

IN PURSUIT OF A QUADRILLION OPERATIONS PER SECOND. Thomas Sterling en *NASA HPCC Insights*, n.º 5; abril 1998. Accesible en www.hpcc.nasa.gov/insights/vol5/petaflop.htm

Página web del autor: www.cacr.caltech.edu/~tron/

A HYBRID TECHNOLOGY MULTITHREADED (HTMT) COMPUTER ARCHITECTURE FOR PETAFLOPS COMPUTING. Thomas Sterling. En la página web del Proyecto HTMT del JPL/NASA en http://htmt.jpl.nasa.gov/intro.html

Página web de la NASA sobre computación y comunicaciones de alto rendimiento: www.hq.nasa.gov/hpcc/petaflops

El trance hipnótico

La hipnosis es un fenómeno empírico que puede tener varios usos terapéuticos, sobre todo para mitigar el dolor

Michael R. Nash

Todo el mundo ha visto en el cine y en la televisión escenas de hipnosis en las que un personaje en chaleco hace que un reloj de bolsillo que pende al extremo de su leontina oscile de un lado a otro ante el rostro de una joven sentada en un salón de la época victoriana. Los ojos de la joven miran fijamente al reloj y acompañan su movimiento. Al cabo de unos instantes la joven se desploma sobre su asiento y, desvanecida y con los ojos cerrados, va respondiendo a las preguntas del hipnotizador con una voz monótona y como de ultratumba.

Esto hace que cuando se pronuncia la palabra "hipnosis" mucha gente piense en danzarines relojes de bolsillo. Pero hoy en día es más corriente que los hipnotizadores sólo pidan a sus sujetos que fijen la mirada en algún pequeño objeto fijo —por ejemplo en una chincheta de color clavada en la pared— mientras les someten a un "parloteo inductivo", que suele consistir en palabras relajantes y que induzcan a concentrarse.

¿Es la hipnosis un fenómeno auténtico? Y si lo es, ¿para qué sirve? Hace pocos años que se ha descubierto que las personas hipnotizadas obedecen a las sugestiones, aunque a veces perciban como extraños los muy llamativos cambios de ideas y de conducta que experimentan. Es como si durante la hipnosis el cerebro suspendiera temporalmente sus trámites de comprobación de la información sensorial que le llega. Algunas personas son más hipnotizables que otras, aunque todavía no se sabe por qué. Pero la hipnosis está resultando médicamente útil para controlar el dolor crónico, contrarrestar la angustia e incluso para ayudar a los pacientes no hospitalizados a recuperarse más deprisa de las intervenciones quirúrgicas, en combinación con otros procedimientos clínicos habituales.



1. NO ES DIFICIL PROVOCAR la hipnosis: con sólo mirar fijamente una señal en la pared y escuchar las monótonas palabras tranquilizadoras que va pronunciando el hipnotizador se ponen en estado hipnótico la mayoría de las personas.

El estudio de los fenómenos hipnóticos pertenece hoy día por entero al dominio de la psicología normal, siendo muy numerosos los artículos que en sus principales revistas especializadas, científicas y médicas, se publican sobre la hipnosis. Ha ayudado a ello la disponibilidad creciente de instrumentos y métodos aptos para discernir entre lo que hay en la hipnosis de realidad fáctica y de exageradas pretensiones. Por supuesto que no han desaparecido los espectáculos de "hipnosis teatrera", de mero entretenimiento; pero los nuevos datos revelan que la fuerza de la sugestión hipnótica, cuando se utiliza correctamente, puede alterar procesos cognoscitivos tan distintos como la memoria y la percepción del dolor.

Separemos el grano de la paja

Para estudiar bien un fenómeno ha de disponerse ante todo de una manera de medirlo. La vara de medir en el caso de la hipnosis son las escalas de susceptibilidad hipnótica de las diversas personas, de gran tradición en la disciplina desde sus comienzos en el siglo XIX, siendo las más usadas actualmente las escalas Stanford. Ideadas a finales de los años 1950 por los psicólogos de la Universidad de Stanford André M. Weitzenhoffer y Ernest R. Hilgard, siguen usándose actualmente para determinar hasta qué punto un sujeto responde a la hipnosis. Una de sus versiones consiste en una serie de 12 actividades que indican la profundidad del estado hipnótico. Ejemplos de ellas son mantener en alto un brazo extendido u oler los contenidos de una botella. En el primer caso se le dice al sujeto que ha de sostener con su brazo extendido una bola muy pesada; se le da por "receptivo" de esta sugestión si su brazo se inclina bajo el imaginado peso. En el segundo caso se le dice que no tiene sentido del olfato y luego se le pasa un frasco de amoníaco por debajo de la nariz; si no reacciona, es muy sensible a la hipnosis; si hace muecas de asco y se aparta, no lo es.

La puntuación en las escalas Stanford va del 0, para los que no responden a ninguna de las sugestiones hipnóticas, al 12, para los que las encajan todas. La mayoría de la gente puntúa en medio de la escala (entre el 5 y el 7) y el 95 % de la población puntúa por lo menos 1.

Lo que la hipnosis es

Investigadores con muy diferentes perspectivas teóricas concuerdan hoy sobre varios principios fundamentales de la hipnosis. El primero es que la capacidad individual de responder a la hipnosis es notablemente estable durante el período adulto. Hilgard realizó un estudio a largo plazo en el que se volvió a someter a las pruebas a los mismos sujetos durante muchos años, con el resultado de que las puntuaciones obtenidas según las escalas eran casi las mismas que hacía 10, 15 o 25 años. Varios trabajos han confirmado que la puntuación Stanford de una persona permanece tan constante a lo largo de su vida, como la del CI, si no más. Las pruebas indican además que la sensibilidad a la hipnosis puede tener un componente hereditario. Es más probable que los mellizos idénticos obtengan similares puntuaciones Stanford que no los que no lo sean, aunque tengan el mismo sexo.

La sensibilidad de una persona a la hipnosis permanece también constante frente a las características del hipnotizador. La edad y la experiencia de éste influyen poco

El autor

MICHAEL R. NASH es profesor asociado de psicología en la Universidad de Tennessee en Knoxville y redactor jefe del *International Journal of Clinical and Experimental Hypnosis*. Doctorado por la Universidad de Ohio en 1983, trabajó aquel mismo año como clínico interno en la facultad de medicina de la Universidad de Yale. Ha publicado dos libros de investigación, uno sobre los fundamentos de la hipnosis y otro sobre los del psicoanálisis, ambos en coautoría con Erika Fromm, de la Universidad de Chicago. Ha publicado numerosos trabajos sobre temas como la memoria humana, la patología disociativa, los abusos sexuales, la psicoterapia y la hipnosis, habiendo recibido numerosos premios por sus investigaciones y estudios clínicos.

o nada en que un sujeto pueda ser hipnotizado, como tampoco lo hace que sea hombre o mujer. Tampoco el éxito de la hipnosis depende ni de que el sujeto esté muy motivado ni de su particular voluntad. A un sujeto muy sensible se le podrá hipnotizar en muy diversas circunstancias experimentales o terapéuticas, mientras que otra persona menos susceptible no quedará hipnotizada por mucho que se esfuerce en lograrlo. Las actitudes y las expectativas negativas pueden, con todo, dificultar la hipnotización.

Varios estudios han demostrado también que la hipnotizabilidad no está en relación con características tales como la credulidad, la histeria, la psicopatología, la confianza, la agresividad, la sumisión, la imaginación o el conformismo social. Resulta interesante en cambio que se encuentre relacionada con la capacidad de la persona para dejarse absorber o ensimismarse en actividades como la lectura, la audición de música y el soñar despierto.

Los sujetos hipnotizados no se comportan cual pasivos autómatas, sino que son más bien activos resolutores de problemas, incorporando a su conducta sus ideas morales y culturales y mostrándose sumamente sensibles respecto a las expectativas expresadas por el hipnotizador. Pero el comportamiento que hipnóticamente se le indica no lo experimenta el sujeto hipnotizado como algo que él esté realizando activamente. Lo típico es que le parezca algo en lo que él no pone ningún esfuerzo, algo que sucede por sí solo, sin más. Los que están en estado hipnótico suelen decir cosas como "la mano se me ha vuelto pesada y se me ha bajado" o "de repente he notado que no siento ningún dolor".

Muchos investigadores creen ahora que la hipnosis consiste, en el fondo, en estos tipos de desconexiones. Respondiendo a la sugestión, los sujetos hacen movimientos sin intencionalidad consciente, dejan de sentir estímulos muy dolorosos y olvidan temporalmente datos que les son familiares. Claro que cosas así suceden también fuera de la hipnosis... a veces en la vida diaria y, más dramáticamente, en determinados trastornos psiquiátricos y neurológicos.

Valiéndose de la hipnosis se crean temporalmente en el laboratorio alucinaciones, compulsiones, ciertos tipos de pérdida de memoria y diversas ilusiones, de modo que estos fenómenos pueden estudiarse de forma controlada.

Lo que la hipnosis no es

A medida que se va sabiendo más acerca de la hipnosis se descubren también cosas que disipan algunas reticencias sobre esta técnica. Una de las objeciones contra ella es la de que consiste simplemente en una imaginación muy viva. En realidad no parece que sea así. Muchas personas muy imaginativas no son buenos sujetos hipnóticos y no se ha podido encontrar relación alguna entre ambas características.

El cargo a la imaginación proviene de que a muchas personas hipnotizables se les puede inducir a que experimenten alucinaciones auditivas y visuales con gran verosimilitud. Pero un elegante estudio que ha empleado tomografía de emisión de positrones (PET), con la que se mide indirectamente el metabolismo, ha demostrado que las regiones del cerebro que se activan cuando al sujeto se le pide que se imagine un sonido son distintas de las que se activan cuando está alucinando por efecto de la hipnosis.

Henry Szechtman y sus colaboradores usaron PET en 1998 para estudiar la actividad cerebral de sujetos hipnotizados a los que invitaban a imaginarse un escenario y que luego experimentaban una alucinación. Los investigadores partían del hecho de que la alucinación auditiva y el acto de imaginarse un sonido son ambos fenómenos que se autogeneran y que, igual que



2. LOS HIPNOTIZADOS pueden cumplir las órdenes que les da su hipnotizador, aunque estén profundamente relajados. A esta mujer hipnotizada se le dice que su brazo extendido se está volviendo tan pesado como el plomo. Los sujetos muy hipnotizables bajan más el brazo a causa del imaginado peso.

la audición real, una alucinación se experimenta como proveniente de una fuente externa. Registrando el flujo sanguíneo local de las zonas activadas durante la audición real y durante la alucinación auditiva, pero no durante la simple imaginación, trataron de determinar en qué parte del cerebro se "etiqueta" erróneamente como auténtico y originado en el mundo exterior un sonido que no es sino alucinación auditiva.

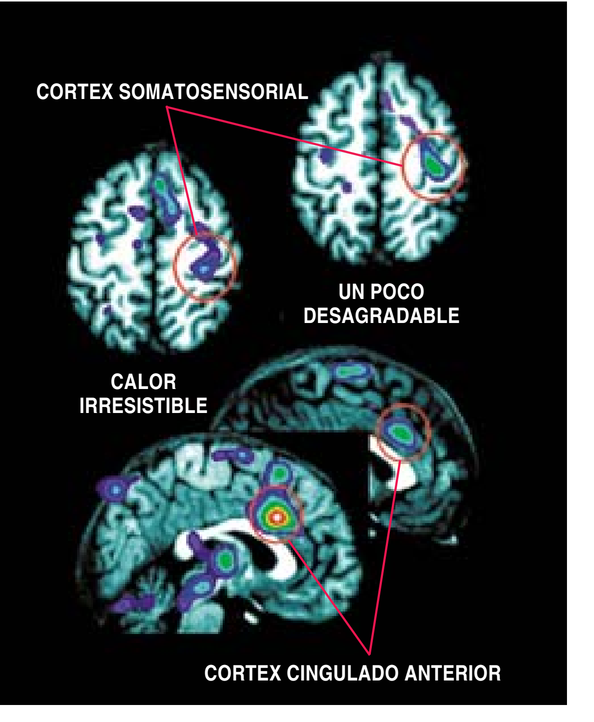
Examinaron la actividad cerebral de ocho sujetos muy hipnotizables y seleccionados previamente por su capacidad para alucinar bajo la hipnosis. Los sujetos estaban bajo hipnosis y yacían en el escáner PET con los ojos cubiertos. Se registraba la actividad de sus cerebros bajo cuatro condiciones: en reposo; durante la audición de una cinta en la que una voz grabada decía: "El hombre no hablaba mucho, pero cuando lo hacía valía la pena escuchar lo que decía"; mientras se imaginaban estar oyendo de nuevo esa voz; y durante la alucinación auditiva que experimentaban tras habérseles dicho que la cinta estaba funcionando otra vez, aunque no era cierto.

Las pruebas demostraron que una región del cerebro llamada córtex cingulado anterior derecho estuvo igual de activa cuando los sujetos alucinaban que cuando oían realmente el estímulo, mientras que no lo estaba cuando se imaginaban oírlo. Es como si la hipnosis hubiese liado de algún modo a esa región del cerebro para hacerla tomar como auténtico sonido lo que no era más que alucinación auditiva.

Otra objeción de los críticos contra la hipnosis atañe a la capacidad de ésta para embotar el dolor. Los escépticos han argüido que tal embotamiento es o un efecto resultante de la simple relajación o la respuesta a un placebo. Pero unos cuantos experimentos han dado al traste con estas explicaciones. Thomas H. McGlashan y sus colegas realizaron en 1969 un estudio ya clásico cuyo resultado fue que la hipnosis resultó tan eficaz reductora del dolor para unas personas poco hipnotizables como una píldora azucarada que se les había hecho creer que era un poderoso analgésico, si bien los sujetos muy hipnotizables se beneficiaron de la hipnosis el triple que del placebo. Hilgard y Éva I. Bányai observaron en 1976 que sujetos que pedaleaban vigorosamente sobre bi-

¿QUE SABE USTED DE LA HIPNOSIS?

SI CREE QUE...	LA REALIDAD ES QUE...
Sólo consiste en tener mucha imaginación.	El poder imaginarse vivamente las cosas no tiene nada que ver con la hipnotizabilidad.
La relajación es una característica importante de la hipnosis.	No lo es. Se ha podido hipnotizar a sujetos mientras hacían vigoroso ejercicio.
Supone ante todo mutuo acuerdo y complicidad.	Muchas personas no han podido ser hipnotizadas aunque lo deseasen.
Es cuestión de querer engañar, es impostura y mentira.	Las reacciones fisiológicas de los hipnotizados indican que no engañan.
Es peligrosa.	Los procedimientos hipnóticos ordinarios no son más nocivos que las lecturas.
Se parece algo a las ensoñaciones.	No. Los hipnotizados son plenamente conscientes de sus acciones.
Responder a la hipnosis es como responder a un placebo.	Estos dos géneros de respuesta no son propiamente comparables.
Ciertos tipos de personalidad son más probablemente hipnotizables.	No se da ninguna correlación importante entre esos dos factores.
Los hipnotizados pierden el dominio de sí mismos.	No lo pierden; son perfectamente capaces de decir no y de poner fin a la hipnosis.
La hipnosis permite que la gente 'reviva' el pasado.	Los adultos que hipnotizados repasan su vida actúan como cuando estando despiertos juegan a imitar a los niños.
El modo que tiene un sujeto de responder a la hipnosis depende de la técnica que se emplee y del hipnotizador que la ponga en práctica.	En condiciones de laboratorio no es importante ninguna de ambas cosas; sólo lo es la hipnotizabilidad del sujeto.
Las personas pueden recordar mejor y con más precisión bajo hipnosis.	La hipnosis puede hacer imprecisa la distinción entre el recuerdo y la fantasía y aumentar indebidamente la confianza del sujeto en su memoria.
A los hipnotizados se les puede inducir a que actúen en contra de sus valores y convicciones.	Los hipnotizados actúan ajustándose plenamente a los patrones de moralidad a que están habituados.
Los hipnotizados, concluida la sesión de hipnosis, no recuerdan lo que ocurrió durante ella.	La amnesia poshipnótica no se produce de manera espontánea.
La hipnosis puede capacitar a los sujetos para llevar a cabo hazañas de fuerza, de resistencia, de aprendizaje y de percepción sensorial que normalmente no están a su alcance.	Los aumentos de fuerza muscular, de memoria retentiva y de agudeza de percepción que se siguen de la sugestión hipnótica no exceden a los que puedan darse en sujetos motivados fuera de la hipnosis.



4. PUEDE QUE LA HIPNOSIS ALIVIE el dolor porque aminore la actividad de las zonas cerebrales implicadas en su percepción. Estas imágenes de las secciones horizontal (*abajo*) y vertical (*arriba*) del cerebro se obtuvieron con tomografía por emisión de positrones (PET) mientras a los voluntarios hipnotizados se les metían las manos en agua muy caliente. Cuando al sujeto hipnotizado se le sugería que por el mucho calor (*izquierda*) iba a tener una sensación dolorosa, la actividad de su córtex somatosensorial, que es el que procesa los estímulos físicos, no era muy diferente de la que se daba al sugerírsele que la sensación sería sólo un poco desagradable (*derecha*). En cambio la parte del cerebro que es sabido que interviene en el sufrimiento del dolor, el córtex cingulado anterior, estaba mucho menos activa cuando a los sujetos se les decía que la sensación iba a ser sólo un poco desagradable (*abajo*).

cicletas estacionarias respondían a las sugestiones hipnóticas exactamente igual que cuando se les hipnotizaba estando arrellanados en un cómodo asiento.

Pierre Rainville y sus colaboradores se propusieron averiguar en 1997 qué estructuras cerebrales intervienen en el alivio del dolor durante la hipnosis. Trataron de localizar las estructuras cerebrales asociadas al componente del sufrimiento del dolor en cuanto distinto de sus aspectos sensoriales. Empleando PET, hallaron que la hipnosis reducía la actividad del córtex cingulado anterior —zona, ya se sabe, implicada en el dolor— pero no afectaba a la actividad del córtex somatosensorial, donde las sensaciones de dolor son procesadas.

Pese a estas averiguaciones, los mecanismos subyacentes al alivio del dolor durante la hipnosis son aún poco conocidos. La mayoría de los investigadores se inclina a creer que el efecto analgésico de la hipnosis tiene lugar en centros cerebrales superiores a los implicados en el registro de la sensación dolorosa. Esto explicaría el hecho de que la mayor parte de las respuestas autonómicas que generalmente acompañan al dolor —tales como la aceleración del ritmo cardíaco— se vean poco o nada afectadas por las sugestiones hipnóticas de analgesia.

Pero ¿no podrían los sujetos estar fingiendo que se les había hipnotizado? Dos estudios clave han puesto fin a esas sospechas.

En un ingenioso experimento de 1971 intitulado ‘El hipnotizador que desaparece’, Frederick Evans y Martin T. Orne compararon las reacciones de dos grupos de sujetos, formado uno por personas que se sabía que eran verdaderamente hipnotizables y otro por personas a las que pidieron que simulasen que se las hipnotizaba. Un experimentador que no sabía con qué grupo estaba tratando puso en práctica un rutinario procedimiento hipnótico que fue de pronto interrumpido por un apagón de luz ficticiamente accidental. Cuando el experimentador salió de la habitación para ver qué ocurría, los sujetos que estaban simulando hipnosis dejaron inmediatamente de hacer comedia: abrieron los ojos, miraron en derredor y dieron fin a la simulación en todos los aspectos. En cambio, los sujetos realmente hipnóticos fueron saliendo, despacio y con alguna dificultad, pero por sí mismos, del estado de hipnosis.

Los simuladores tienden también a interpretar exageradamente su papel. Cuando a estos sujetos se les propone que olviden ciertos aspectos de la sesión de hipnosis, sus declaraciones de que no recuerdan son a veces, por ejemplo, omniabarcadoras y muy tajantes, o aseguran tener extrañas experiencias de las que nunca o en muy raras ocasiones hablan los sujetos realmente hipnotizados. Taru Kinnunen, Harold S. Zamansky y sus colaboradores han sometido a unos simuladores a la tradicional prueba detectora de mentiras. Y han comprobado que cuando los sujetos realmente hipnóticos responden bajo hipnosis a las preguntas sus reacciones fisiológicas cuadran con los criterios de veracidad, mientras que las de los simuladores no lo hacen.

La hipnosis y la memoria

Puede que en ninguna otra cuestión haya generado la hipnosis más controversia que en la de la “recuperación” de la memoria. La psicología tiene establecido que los seres humanos son bastante capaces de discernir si un suceso ha ocurrido realmente o si sólo se lo han imaginado. Pero en algunas circunstancias nos falla tal discernimiento: podemos llegar a creer (o ser inducidos a creer) que nos ha ocurrido algo, sin que en realidad haya sido así. Uno de los indicios clave al que los seres humanos parecen recurrir para hacer la distinción entre lo real y lo imaginado es el de la experiencia del esfuerzo. Parece como si, al codificar un recuerdo, una ‘etiqueta’ nos indicase la cantidad de esfuerzo empleado: si el evento es etiquetado como habiendo supuesto por nuestra parte una buena proporción de esfuerzo mental, tendemos a interpretarlo como fruto de nuestra imaginación; si es etiquetado como habiendo requerido relativamente poco esfuerzo mental, tendemos a interpretarlo como algo que nos ocurrió en realidad. Dado que un importante distintivo de la hipnosis es precisamente la sensación de falta de esfuerzo, compréndese que los hipnotizados puedan confundir tan fácilmente un imaginado suceso pretérito con algo en verdad sucedido hace mucho.

Y también así es posible que algo meramente imaginado pueda llegar a introducirse como un episodio en la historia de nuestra vida.

Este efecto ha sido comprobado en numerosos estudios. Por ejemplo, a sujetos a los que se ha hipnotizado con facilidad se les suele poder inducir a que refieran con toda suerte de detalles acontecimientos de los primeros meses de su vida, aun cuando en realidad tales eventos nunca ocurrieran y por más que, sencillamente, los adultos no tengan ninguna posibilidad de recordar la primera infancia. Cuando se les propone regresar a la infancia, los sujetos muy hipnotizables se comportan de una manera más o menos infantil, son con frecuencia muy emotivos y pueden después insistir en que han estado reviviendo de veras su infancia. Pero las investigaciones confirman que esas respuestas no son en modo alguno auténticamente infantiles. No lo son siquiera la pronunciación, los gestos, la emoción, la percepción, el vocabulario, las formas de pensar. Esas actuaciones tienen tan poco de infantiles como las de los adultos cuando juegan a remedar a los niños. Resumiendo, en la hipnosis no hay nada que capacite al sujeto para superar la naturaleza y las limitaciones básicas de la memoria humana; a nadie le permite exhumar recuerdos que tengan decenios de antigüedad ni recorrer hacia el pasado, desandándolo, el desarrollo de su existencia.

Para qué sirve la hipnosis

¿Cuáles son, pues, los beneficios médicos de la hipnosis? Un grupo de asesores técnicos del Instituto Nacional de la Salud estadounidense declaró en 1996 que la hipnosis es un procedimiento eficaz para aliviar el dolor en los casos de cáncer y de otras enfermedades crónicas. Numerosos estudios clínicos indican también que puede reducir el intenso dolor que sufren los pacientes en el desbridaje de quemaduras, los niños al extraérseles médula ósea y las mujeres al parir. Por ejemplo, según un metaanálisis publicado en un reciente número especial del *International Journal of Clinical and Experimental Hypnosis*, las sugestiones hipnóticas aliviaron el dolor del 75 % de los 933 sujetos que participaron en 27 experimentos diferentes. El efecto analgésico de la hipnosis es frecuentemente muy notorio y en algunos casos el grado de alivio que proporciona es igual o superior al que se consigue con la morfina.

Pero la Sociedad de Hipnosis Clínica y Experimental mantiene que la hipnosis no puede, y no debe, ser la sola y única intervención médica o psicológica para todo trastorno. La razón de ello es que todo el mundo que sea capaz de leer un escrito con algún grado de expresividad puede aprender a hipnotizar a cualquiera. Quien tenga un problema médico o psicológico deberá ante todo consultar a un profesional sanitario cualificado para que le haga un diagnóstico. Ese especialista será el que mejor podrá decidir con el paciente si la hipnosis es aconsejable en su caso y, de serlo, cómo incluirla en su tratamiento.

La hipnosis puede hacer más eficaz la psicoterapia para algunos estados morbosos. Según otro metaanálisis en el que se examinaron los resultados conseguidos por los sujetos de 18 estudios separados, aquellos pacientes que recibieron psicoterapia de la conducta más hipnosis para trastornos como obesidad, insomnios, angustia e hipertensión mostraron mayor mejoría que el 70 % de los tratados sólo con psicoterapia. Tras la publicación de estos datos, un grupo de investigadores pertenecientes a la Sociedad Psicológica de América validó la hipnosis como procedimiento añadido para el tratamiento de la obesidad. Pero aún se está estudiando si sirve para otros trastornos con componente conductual. La drogadicción y el alcoholismo no responden bien a la hipnosis y no hay pruebas inequívocas de que ayude a dejar de fumar.

Dicho esto, hay muchas aunque aún no definitivas pruebas de que la hipnosis puede ser un factor eficaz en el más amplio tratamiento de otros estados morbosos. En un orden aproximado de tratabilidad mediante la hipnosis se cuentan entre ellos: un subgrupo de asmas; algunas afecciones dermatológicas, incluidas las verrugas; el síndrome de colon irritable; la hemofilia; y la náusea asociada a la quimioterapia. Se desconoce el mecanismo por el que la hipnosis alivie estos trastornos. Las hipótesis de que aumente la inmunidad del organismo en cualquier aspecto clínicamente importante carecen hoy por hoy de fundamento.

Hilgard predijo hace ya más de 30 años que, a medida que se fuese difundiendo por la comunidad científica el saber acerca de la hipnosis, tendría lugar un proceso de "familiarización" con la misma: los investigadores recurrirían cada vez más a menudo a esta técnica, que llegaría a ser un instrumento habitual en el estudio de otros temas interesantes, como la alucinación, el dolor y la memoria. Pronosticó también que, una vez basado científicamente, el uso clínico de la hipnosis acabaría siendo de lo más normal para algunos pacientes con problemas especiales. Aunque actualmente no estemos todavía en eso, es indudable que la hipnosis ha progresado mucho desde que requiriera el balanceo de un reloj de bolsillo.

Bibliografía complementaria

HYPNOSIS FOR THE SERIOUSLY CURIOUS. Kenneth Bowers. W. W. Norton, 1983.

CONTEMPORARY HYPNOSIS RESEARCH. Erika Fromm y Michael R. Nash. Guilford Press, 1992.

Para una introducción a la historia de la hipnosis y sus actuales usos, en la Red: www.institute-shot.com/hypnosis-and-health.htm.

Para conocer investigaciones sobre la hipnosis y sus aplicaciones clínicas, cfr. *International Journal of Clinical and Experimental Hypnosis*, en la Red: www.sunsite.utk.edu/IJCEH.

Un vídeo de una auténtica sesión de hipnosis se hallará en: www.sciam.com/2001/0701issue/0701nash-box1.html.

PERFILES

Julie Wakefield

CHRISTOF KOCH: Reflexión sobre la consciencia

Sobre el escritorio de Christof Koch destaca un busto frenológico de cerámica, cuyo cráneo está dividido en regiones arbitrarias por negras líneas de laca. Este inconformista científico me tranquiliza: no hay miedo de que me examine con el calibre; le divierte tanto como al resto de nosotros la propaganda frenológica decimonónica de Lorenzo Fowler, que sostenía que hay áreas corticales donde residen atributos personales como el "amor a la patria" o la "circunspección". Pero aprecia ese prematuro mapa del cerebro porque le recuerda que él también busca "un conjunto discreto de neuronas que podrían encontrarse en áreas muy diferentes, pero que comparten una serie de propiedades que las hace responsables de generar la consciencia".

Koch, de 44 años, dirige el programa de computación y sistemas neuronales en el Caltech, el Instituto Técnico de California. Llegó en 1986, una época en la que la investigación sobre la consciencia todavía estaba considerada un suicidio intelectual incluso para estudiosos del cerebro ya consagrados. Pero la notoria atención que le prodigaron los premios Nobel Gerald M. Edelman y Francis Crick, conjugada con los avances en la obtención de imágenes sobre el funcionamiento del cerebro, le han valido el respeto a esta disciplina y a sus investigadores. Los neurobiólogos han desechado la idea de que Koch sea un extravagante temerario, a pesar de que el verano pasado se hiciera tatuar en el brazo el logotipo de los ordenadores Apple para demostrar su amor por el Macintosh (una fogosidad ni siquiera igualada por Steve Jobs). Dirige a una veintena de investigadores y califica el objetivo que se han propuesto —explicar la consciencia— como "uno de los principales problemas que le queda por resolver a la ciencia moderna".



Koch cree que en algún lugar del cerebro existen ciertos agregados de neuronas a los que compete la explicación de la propia identidad

Los primeros años de Koch —hijo de diplomáticos alemanes nacido en Estados Unidos— transcurrieron de embajada en embajada: de Kansas City a Amsterdam, sin olvidar Bonn, Ottawa y Marruecos. Al principio quería ser cosmólogo, pero se dio cuenta de que no estaba dotado para la matemática avanzada. Dos libros despertaron su interés en las computaciones del sistema nervioso, uno de los cuales ofrecía una perspectiva del cerebro desde el punto de vista de un físico. Su autor, Valentino Braitenberg, acabó siendo uno de los tutores de Koch en el Instituto Max Planck de Cibernética Biológica en Tubinga (Alemania), donde Koch obtuvo su doctorado en física en 1982.

Koch empezó a reflexionar seriamente sobre la consciencia en el verano de 1989, con ocasión de un punzante dolor de cabeza. Se preguntaba por qué un racimo de neuronas lanzando señales dan como resultado el dolor, siendo así que los electrones que se mueven por un transistor no le provocan al ordenador estados subjetivos. Por aquel entonces él y Crick, uno de los codescubridores del ADN, habían hablado ya del tema varias veces (se habían encontrado casualmente en Europa y se hicieron amigos). Pronto escribieron el borrador de su primera publicación conjunta sobre la consciencia.

La percepción visual es el principal sendero por el que Koch se adentra en los lóbregos entresijos de la mente. La vista, además de que se manipula con facilidad y es el mejor conocido de los sentidos, tiene aspectos fundamentales comunes a muchas especies, desde las moscas hasta los seres humanos. A Koch esos puntos coincidentes le parecen importantes porque cree que las diversas facetas de la consciencia —la vista, el olfato, la lengua, incluso el yo— son

todas “elaboraciones de un proceso biológico común”, para consternación de muchos filósofos. Koch ha empleado grabaciones electrofisiológicas y representaciones gráficas de la actividad cerebral de los primates para estudiar las operaciones neuronales subyacentes a la visión.

Sus trabajos sobre la vista han contribuido por de pronto a aclarar cómo actúan las neuronas. Koch fue de los primeros en poner en tela de juicio la comparación preponderante que asemeja las conexiones del cerebro humano a los circuitos de un ordenador. En vez de asumir la noción de que el pensamiento resulta de la acción combinada de miles de millones de neuronas, cada una de las cuales es un componente relativamente simple, afirma que las neuronas individuales pueden llevar a cabo complejos procesamientos.

Y cada vez hay más datos para afirmar que las células neuronales funcionan no sólo como una red de dispositivos interruptores lineales, que transmiten o aíslan impulsos eléctricos, sino también como entes individuales que trabajan autónoma y adaptativamente. Las neuronas pueden sumar señales, restarlas, multiplicarlas, filtrarlas y promediarlas, entre otras funciones. Las capacidades de procesamiento de las neuronas individuales eclipsan a los elementos de que disponen quienes proyectan circuitos electrónicos.



TROCEADA. La frenología está desacreditada, pero a Koch le incita a elucubrar sobre la consciencia

Crick y él, que siguen colaborando, intentan comprender la consciencia visual a nivel neuronal. Por el momento han propuesto algunas audaces y controvertidas hipótesis que describen cómo identificar las neuronas correlacionadas con la consciencia. La primera, formulada en 1990, se refiere a la existencia de un patrón de oscilación y de sincronización entre grupos de neuronas durante la estimulación visual. Los investigadores han reformulado esta aseveración en épocas recientes, sosteniendo que las neuronas muestran dos formas de actividad. Ambas pueden desembocar en un comportamiento, pero sólo una da lugar a los estados subjetivos de consciencia. Y es este estado el que está asociado con las descargas neuronales sincronizadas.

Para comprobar estos supuestos Koch se concentra en la astuta mente de los roedores. Su equipo aspira, entre otras cosas, a crear roedores “autómatas” desactivando subpoblaciones específicas de neuronas, disociando así el comportamiento animal de la percepción de sí mismo. De esta manera podrían quedar de manifiesto las neuronas cruciales para la consciencia, aunque primero hay que demostrar que los roedores son efectivamente conscientes, mediante experimentos basados en una versión más compleja del condicionamiento pavloviano llamada condicionamiento por indicios. De desenmarañarse las correlaciones neuronales básicas, según Koch, quedará definitivamente zanjada la cuestión de si los bebés humanos son conscientes.

Por lo que respecta a una teoría de la gran unificación de la mente y el cerebro, Koch y Crick mantienen una actitud humilde, pensando que los últimos 2400 años —desde Sócrates, Platón y Aristóteles— han demostrado la futilidad de elaborar teorías a gran escala. Por ahora piensan que faltan los elementos básicos para poder elaborar una teoría de este tipo. Koch compara las posibilidades de éxito en la búsqueda de un modelo general en este momento con las que hubiese tenido Aristóteles para desarrollar en su época una teoría hereditaria correcta.

No todos los investigadores de renombre que se ocupan de la consciencia piensan que localizar grupos específicos de neuronas sea la clave. Edelman y Giulio Tononi presienten las limitaciones. Tononi piensa que incluso si se pudiera establecer una lista reducida de neuronas, no se entendería por qué algunas de ellas contribuyen a la experiencia completa de la consciencia y otras no, pues las diferencias aparentes parecen insuficientes para salvar la distancia metafísica. Ellos son partidarios de caracterizar procesos neuronales más dilatados que den razón de las propiedades de la consciencia, a saber, la diferenciación (complejidad neuronal) y la integración (agrupamiento funcional). Existiría así un enorme número de estados conscientes, cada uno de los cuales es un todo unificado que no puede subdividirse. Estas dos propiedades podrían medirse para evaluar si un grupo de neuronas contribuye a una experiencia consciente. La combinación de complejidad neuronal y de agrupamiento funcional constituye la base de lo que han dado en llamar hipótesis de núcleo dinámico.

Un grupo de filósofos acaudillado por David Chalmers cree por su parte que al final surgirá una teoría científica de la consciencia, teoría que no será simplemente neurofisiológica. Roger Penrose y él entienden que, antes de que se pueda establecer incluso de qué tipo sea, es necesario descubrir nuevas leyes o principios físicos. Y eso porque la consciencia, aseguran, es un fenómeno irreducible, al igual que el espacio, el tiempo y la gravedad.

Koch admite las dificultades de desarrollar una explicación neurofisiológica de la experiencia subjetiva, pero piensa que la neurociencia acabará por resolver el enigma y considera abierta la posibilidad de que alguna vez se disponga de una descripción reduccionista satisfactoria, como la que se cree tener para la vida. Y recita, parafraseándola, una sentencia del famoso biólogo inglés J.B.S. Haldane: “El mundo no sólo es un sitio extraño, sino uno más extraño de lo que podemos imaginar”.

La electrónica del espín

La técnica de los semiconductores se basa casi exclusivamente en dispositivos como los transistores, que obedecen a las idas y venidas de pequeños paquetes de cargas electrónicas. Pero durante el pasado decenio se han desarrollado otros dispositivos que utilizan para ello el espín del electrón en vez de su carga. Según la mecánica cuántica, todos los electrones presentan un "espín" (momento angular de rotación) que les confiere un momento magnético, como si fueran diminutas barras imantadas. Se han conseguido numerosos avances en este nuevo terreno de la electrónica del espín, que también podríamos llamar "espintrónica", pero todavía no se ha logrado un dominio tan exquisito sobre la circulación de espines en los dispositivos microscópicos como el que se tiene sobre el flujo de cargas electrónicas corrientes.

I. Malajovich, D. D. Awschalom, J. J. Berry y N. Samarth han puesto de manifiesto un aspecto importante de la espintrónica de los semiconductores: es viable la transferencia de espines entre materiales semiconductores diferentes de una manera coherente (es decir con los espines alineados) y con gran rendimiento. Esto marca un hito hacia la consecución de dispositivos en los que se utilice el espín electrónico.

Una de las aplicaciones más apremiantes y sugestivas de la espintrónica a los semiconductores sería la computación cuántica. Los ordenadores cuánticos podrían conseguir enormes capacidades de procesamiento, en parte porque los dígitos binarios (bit) de los ordenadores clásicos presentan dos estados solamente (0 o 1), mientras que los bit cuánticos o "qubit" (*quantum bit*) admiten muchos estados más, todas las mezclas complejas posibles de 0 y 1. Hasta ahora sólo se han conseguido ejemplos duraderos de "qubit" elementales en la forma de átomos y de iones sometidos a un frío extremo. Estos qubit suelen estar sepultados en las profundidades de una gran masa de aparatos especiales que los mantienen en un vacío sumamente riguroso. Allí son alimentados e interrogados por un extenso y complicado conjunto de instrumentos de precisión de técnica láser. Pero los ordenadores cuánticos realizables necesitarán en último término de verdaderas redes, que comprendan gran número de qubit y funcionen todas en cooperación de manera coherente. La simple transposición de la escala de la técnica existente, de modo que se atrapen muchos iones y muchos átomos a temperaturas extremadamente bajas con el nivel de complejidad requerido, es claramente impracticable. Pero el éxito de la microelectrónica despierta grandes esperanzas de que los espines de los electrones y de los núcleos atómicos ofrezcan la clave para acometer ese cambio de escala en los dispositivos semiconductores. Los espines en semiconductores deben, empero, poseer varios atributos para que puedan construirse con ellos qubit utilizables.

Los trabajos realizados en espintrónica nacen de la investigación sobre el comportamiento de los espines en dispositivos metálicos. La espintrónica basada en metales ya se está utilizando en las unidades de control de los ordenadores más avanzados y en otros dispositivos magnéticos. Pero este nuevo tipo de electrónica se va centrando cada vez más en los materiales semiconductores y en sus técnicas de elaboración. Las innovaciones de la gran industria electrónica de semiconductores han hecho progresar unos y otras hasta el punto de alcanzar un grado verdaderamente notable de pureza de materiales y de precisión técnica, lo que ofrece la oportunidad de ensamblar nuevos dispositivos y materiales por procedimientos compatibles con la metodología electrónica existente. Además de las aplicaciones potenciales a los sistemas cuánticos de información, la espintrónica podría en un futuro próximo conducir al desarrollo de dispositivos semiconductores capaces de ejecutar operaciones lógicas y de almacenamiento a gran velocidad, semejantes a las que realiza la electrónica corriente de transporte de carga, pero con un consumo de energía mucho menor.

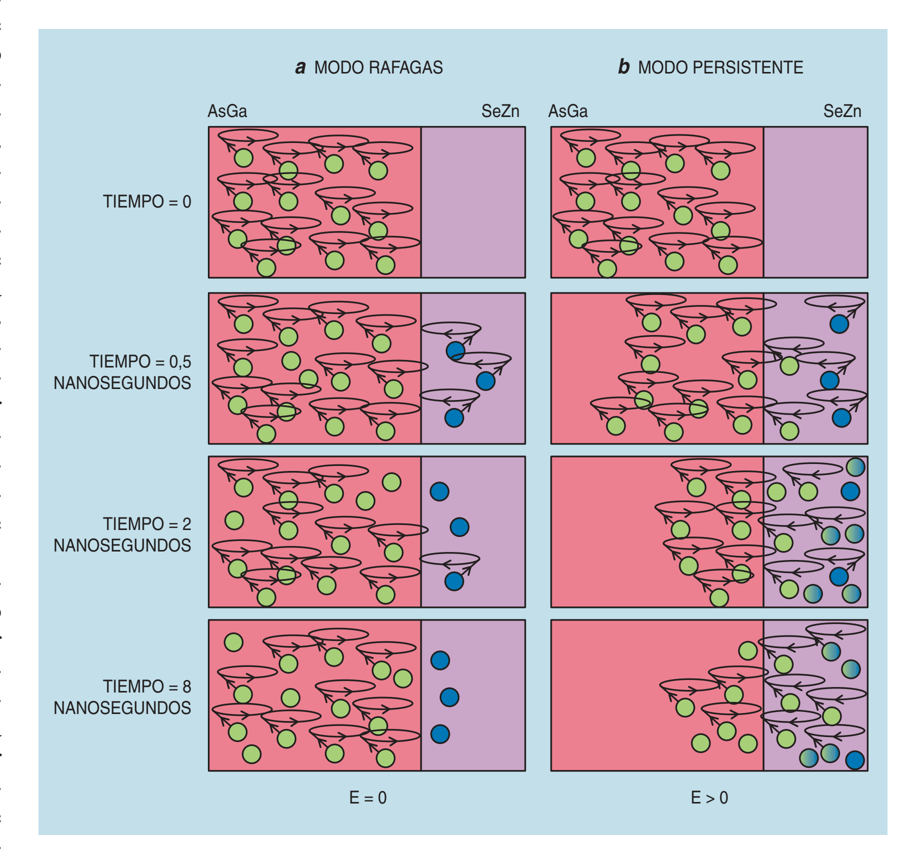
Los espines de los núcleos y de los electrones son los responsables del magnetismo de una sustancia. El funcionamiento de un dispositivo espintrónico se centra claramente por tanto en la capacidad de detectar y de gobernar las propiedades magnéticas. Para el éxito de la espintrónica en semiconductores hay tres requisitos previos de largo alcance, que afectan a tres aspectos fundamentales de su operación. Primeramente, todos los dispositivos espintrónicos se apoyan en portadores polarizados en cuanto al espín, es decir, en electrones que en su gran mayoría tienen los espines alineados, casi todos ellos con espín en un cierto sentido ("*a derechas*") o en el contrario ("*a izquierdas*"). La polarización permanente del espín se produce de un modo natural en los materiales ferromagnéticos, que en condiciones normales pueden servir como fuente estable de portadores de espín polarizado. En segundo lugar, es necesario transferir eficazmente los espines móviles a través de las interfaces entre materiales semiconductores diferentes. Dada la ubicuidad de tales interfaces en los dispositivos electrónicos complejos, la transferencia tiene que progresar sin pérdida de polarización apreciable. La tercera condición es que, una vez transferidos los espines al corazón de un dispositivo en el que resida la función de conmutación o de almacenamiento, su polarización debe mantenerse durante el tiempo suficiente para que se realice la operación deseada.

Precisamente en los años más recientes se ha logrado avanzar ha-

cia la satisfacción de estos requisitos. Los semiconductores, que normalmente no son magnéticos, como el arseniuro de galio, se han convertido en ferromagnéticos mediante la adición de contaminantes magnéticos. Algunos de estos nuevos materiales siguen siendo ferromagnéticos aun a temperaturas relativamente elevadas. Lo esencial es que su compatibilidad con los semiconductores no magnéticos ordinarios permite construir interfaces óptimas en dispositivos espintrónicos que son íntegramente semiconductores. Gracias a ello los electrones de espín polarizado se transfieren con buen rendimiento entre las capas de material respectivas. Esto ha quedado demostrado por el reciente éxito de los diodos fotoemisores de base espintrónica, que utilizan la inyección eléctrica de espines para emitir luz de polarización circular. Se han empleado técnicas ópticas para excitar espines en semiconductores dopados. Dentro de un campo magnético estos espines giran continuamente (en precesión) alrededor del campo. Es muy importante señalar que se observa la persistencia coherente de esta precesión durante períodos sorprendentemente prolongados.

Estos comienzos son prometedores, pero aún no se han colocado todas las piezas en su sitio. Por ejemplo, la inyección (transferencia) de espines a través de interfaces sólo se ha demostrado hasta ahora en estructuras formadas por materiales semimagnéticos, que únicamente proporcionan electrones de espín polarizado al estar sometidos a campos magnéticos muy intensos, esto es, a niveles sólo alcanzables en laboratorios que utilicen imanes superconductores. Por el contrario, cuando los electrones procedentes de un superconductor ferromagnético, que tienen polarización de espín intrínseca aun en ausencia de campo externo, se inyectan eléctricamente desde un semiconductor ferromagnético a través de una interfaz en otro semiconductor no magnético, los resultados hasta la fecha son mucho menos pronunciados. Aunque la demostración es en sí misma un logro importante en estas condiciones, el rendimiento alcanzado hasta ahora sólo llega a unas pocas unidades por ciento.

Malajovich y sus colaboradores han demostrado ahora que el rendimiento de la transferencia puede mejorarse hasta cuarenta veces utilizando campos eléctricos que "tiren" de los espines a través de una interfaz semiconductora. Primeramente utilizan un impulso de láser de la frecuencia adecuada para crear un depósito muy duradero de portadores de espín polarizado, arseniuro de galio en este caso. A continuación, en dos experimentos distintos, demuestran que los campos eléctricos, tanto los aplicados desde el exterior como los interiores, pueden lograr un gran rendimiento en la transferencia de espines desde este depósito a otro semiconductor —el seleniuro de zinc (*véase la figura*)—. Los campos eléctricos internos son creados en este último caso por la inclusión explícita de dopantes eléctricos de distinta polaridad en las capas semiconductoras. Se establece así un potencial "natural" en la in-



El espín del electrón se transfiere a través de la interfaz que separa dos semiconductores diferentes (arseniuro de galio, AsGa, y seleniuro de zinc, SeZn) en el seno de un campo magnético. En el modo ráfagas, a*, no se aplica campo eléctrico externo* (E = 0) *y sólo atraviesa la interfaz una breve y rápida ráfaga de espines* (círculos). *La mayoría de ellos siguen atrapados dentro del depósito de espines de AsGa. Pero una vez que han cruzado al SeZn pasan a rotar en sentido opuesto y decrecen a un ritmo característico de los espines de SeZn* (círculos azules). *En el modo persistente,* b*, se utiliza un campo eléctrico externo* (E > 0) *para atraer los espines desde el depósito de AsGa a la capa de SeZn. Los espines recién llegados al SeZn llevan consigo información sobre la precesión (giro) de los espines en el depósito* (círculos verdes). *Transcurrido algún tiempo dentro del SeZn* (círculos verde/azules)*, pierden esa información. Como los que cruzaron en la ráfaga inicial* (azules) *nunca la tuvieron, ninguno de ellos contribuye al espín neto resultante. Mientras tanto el continuo suministro de nuevos espines desde el AsGa crea una corriente de espines, que no es característica del SeZn sino que evoluciona a la manera de los espines de AsGa*

terfaz entre semiconductores de contaminación diferente, lo cual constituye la base de los diodos semiconductores.

Los electrones presentan propiedades de espín diferentes según se encuentren dentro de un sólido o en el vacío. Las propiedades magnéticas (y por tanto el espín) de un electrón se cuantifican por medio de un "factor *g*" que caracteriza la energía del electrón en un campo magnético. Uno de los aspectos más curiosos es que, en las mejores condiciones de transferencia, la población total de espines transferidos (dentro de la capa colectora) resulta tener un comportamiento global acorde con el carácter de su entorno original, que en este caso es el depósito semiconductor original.

Ello es debido a un modo de transferencia persistente, recientemente identificado, en virtud del cual el depósito se comporta como una verdadera "batería de espines". Por lo tanto puede hacerse que, en condiciones especiales, el depósito genere continuamente una corriente de espines polarizados a través de la interfaz hasta su total agotamiento.

Malajovich y sus colegas lo han demostrado mediante una técnica delicada que permite interrogar la identidad (el factor *g* efectivo) del conjunto de espines transferidos. Encuentran así que el factor *g* efectivo de la población de espines transferidos puede someterse a continuas metamorfosis desde un valor característico del depósito hasta el valor propio del semiconductor colector. El comportamiento exacto depende de la intensidad del campo eléctrico efectivo. Este inesperado fenómeno podría servir de base para los llamados dispositivos espintrónicos funcionales, en los que el carácter de las corrientes de espines es gobernable mediante campos eléctricos y magnéticos a la vez. Una perspectiva que imprime un curioso "giro" nuevo a la naciente técnica de la espintrónica de semiconductores.

MICHAEL L. ROUKES
Depto. de Física, Instituto Técnico de California, EE.UU.
roukes@caltech.edu

Los cuadrados perdidos de Franklin

La celebridad de Benjamin Franklin (1706-1790) se debe a que fue uno de los padres de la independencia de los Estados Unidos y el inventor único del pararrayos. No parecía, en cambio, que se sintiera atraído por las matemáticas. Mas el estudio de sus papeles demuestra lo contrario. Paul Pasles, de la Universidad de Villanova, en Pennsylvania, ha descubierto en la obra monumental del físico que también se interesó por los cuadrados y los círculos mágicos, llegando a construir algunos de raras propiedades, entre los que se encuentra uno inédito hasta nuestros días.

Un cuadrado mágico es una matriz cuadrada de *n* columnas y *n* filas. En cada una de sus casillas se inscribe un número entero positivo comprendido entre 1 y n^2, sin repetición. El cuadrado se llama semimágico si las sumas de los números de las filas y de las columnas tienen todas un mismo valor, *C*, al que se denomina constante mágica. El cuadrado es completamente mágico si las sumas de los números situados en las diagonales

52	61	4	13	20	29	36	45
14	3	62	51	46	35	30	19
53	60	5	12	21	28	37	44
11	6	59	54	43	38	27	22
55	58	7	10	23	26	39	42
9	8	57	56	41	40	25	24
50	63	2	15	18	31	34	47
16	1	64	49	48	33	32	17

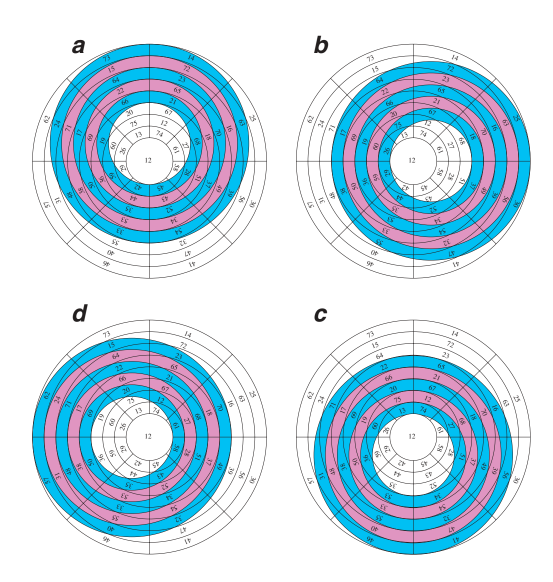
1. En este cuadrado mágico la constante mágica es igual a 260. Cada cuadrado delimitado en blanco es también un cuadrado mágico. La suma de cada una de las filas, de cada columna, de todo rectángulo de 2 por 4 (remarcado en rojo)*, de todas las diagonales y de todas las líneas acodadas* (en amarillo) *es igual a 260*

son también iguales a la constante mágica. Un cuadrado es mágico en el sentido de Franklin cuando la suma de los enteros que se encuentran en sus diagonales acodadas es también igual a la constante mágica. Una diagonal acodada llega hasta el centro y luego da un giro de 90 grados que conecta el vértice adyacente con el vértice inicial, en lugar de continuar hasta el vértice opuesto al inicial.

Uno de los cuadrados mágicos redescubiertos es un cuadrado de ocho casillas de lado (*véase la figura 1*). Se trata de un cuadrado semimágico, pero ésa es la menor de sus propiedades. La suma de cada semifila y de cada semicolumna es igual a 130, o sea, la mitad de la constante mágica. Este cuadrado se descompone asimismo en cuatro cuadrados mágicos: la suma de las 32 líneas que Franklin denomina "dobladas", es decir, acodadas a escuadra, es también igual a la constante mágica.

Franklin construyó un círculo mágico dotado de propiedades notables partiendo de uno de sus cuadrados (*véase la figura 2*). La suma de los números de cada uno de los ocho octantes y de los de cada anillo, sea concéntrico (*en blanco en la figura*) o excéntrico (*en azul o en rosa en la figura*), es la misma. Al girar 90, 180, o 270 grados los anillos coloreados esta propiedad subsiste además intacta.

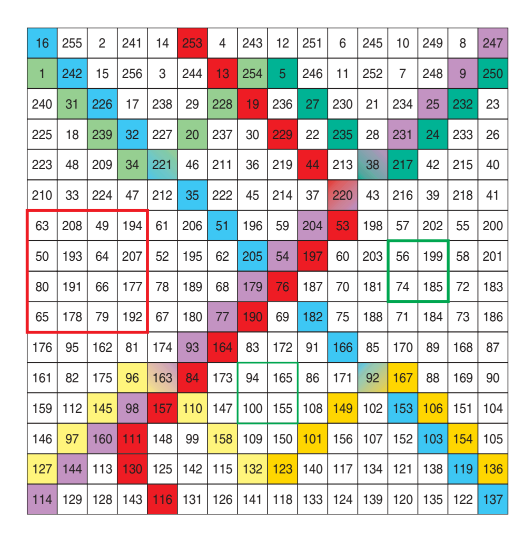
El cuadrado mágico de Franklin jamás publicado hasta ahora es un cuadrado de 16 casillas de lado (*véase la figura 3*), cuya constante mágica es ahora 2056. Para empezar, el cuadrado no sólo es completamente mágico en el sentido habitual, sino también en el de Franklin, pues la suma de cada semidiagonal (*en azul y en malva en la figura 3*) es igual a la mitad de la constante mágica. La suma de cada semicolumna y de cada semifila es también igual a la mitad de la constante mágica. La suma de los números de cada cuadrado de cuatro casillas (*contorneado en verde en la figura 3*) es igual a la cuarta parte de la constante mágica; resulta así que la suma de cualquier cuadrado de 16 casillas (*contorneado en rojo en la figura 3*) es igual a la cons-



2. En este círculo mágico, las sumas de cada uno de los enteros de los ocho octantes de cada anillo concéntrico (en blanco) *o excéntrico* (en azul y rosa) *son constantes, incluso aunque hagamos girar 90* (b), *180* (c)*, o 270* (d) *grados los anillos coloreados*

tante mágica. La suma de cada línea doblada de ocho casillas (*en la figura 3, dos están en verde, y dos, en amarillo*) de este cuadrado es la mitad de la constante mágica. Por último, la suma de las casillas de varias líneas dobladas desfasadas (*en rojo en la figura 3*) es también igual a 2056.

Se han propuesto métodos para construir este cuadrado, aunque sin tener certeza plena. Según P. Pasles, Franklin se habría servido de un método deducido del de Lo Shu, en el cual los enteros se van situando a salto de caballo. En el cuadrado de la figura 3 cada número se encuentra separado de su predecesor o de su sucesor por dos casillas en una dirección y otra en la transversal. Tales figuras mágicas contradicen al físico y diplomático, que, según sus propias palabras, nada entendía de matemáticas.



16	255	2	241	14	253	4	243	12	251	6	245	10	249	8	247
1	242	15	256	3	244	13	254	5	246	11	252	7	248	9	250
240	31	226	17	238	29	228	19	236	27	230	21	234	25	232	23
225	18	239	32	227	20	237	30	229	22	235	28	231	24	233	26
223	48	209	34	221	46	211	36	219	44	213	38	217	42	215	40
210	33	224	47	212	35	222	45	214	37	220	43	216	39	218	41
63	208	49	194	61	206	51	196	59	204	53	198	57	202	55	200
50	193	64	207	52	195	62	205	54	197	60	203	56	199	58	201
80	191	66	177	78	189	68	179	76	187	70	181	74	185	72	183
65	178	79	192	67	180	77	190	69	182	75	188	71	184	73	186
176	95	162	81	174	93	164	83	172	91	166	85	170	89	168	87
161	82	175	96	163	84	173	94	165	86	171	92	167	88	169	90
159	112	145	98	157	110	147	100	155	108	149	102	153	106	151	104
146	97	160	111	148	99	158	109	150	101	156	107	152	103	154	105
127	144	113	130	125	142	115	132	123	140	117	134	121	138	119	136
114	129	128	143	116	131	126	141	118	133	124	139	120	135	122	137

3. Este cuadrado mágico de Benjamin Franklin posee propiedades notables, que se describen en el texto

Agua antiadherente

Las personas mayores lo afrontan con disgusto, pero para un niño curioso la rotura de un termómetro de mercurio es todo un espectáculo, que le hace quedarse absorto ante el ir y venir de las elusivas gotitas plateadas. El sustantivo inglés "quicksilver" (azogue, hidrargiro o plata líquida, expresiones tradicionales para el mercurio) describe adecuadamente las gotitas, que parecen rodar rápidamente como si fueran canicas. Este curioso comportamiento plantea muchas cuestiones interesantes en campos muy diversos, desde la química y la ingeniería, que estudian la dinámica de las gotas, hasta la astronomía, donde tiene que ver con la estabilidad de estrellas y planetas en rotación. ¿Cómo y cuándo pueden rodar las gotas líquidas sobre una superficie? ¿Con qué velocidad se pueden mover? ¿Se pueden manejar? ¿Hasta qué punto?

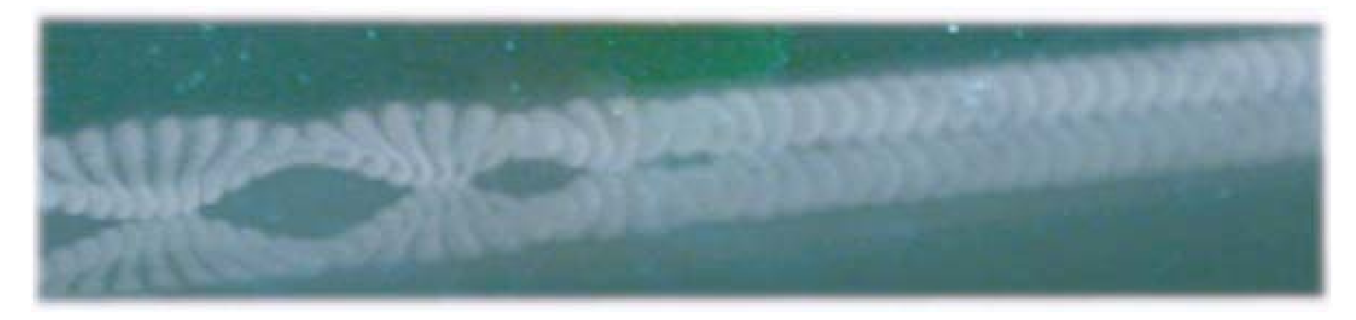
P. Aussillous y D. Quéré han publicado recientemente los resultados de ciertos experimentos que empiezan a esclarecer estas cuestiones, motivados por la necesidad de comprender las propiedades de humedecimiento de superficies dotadas de diferentes grados de afinidad para los líquidos, entre las que se encuentran las completamente hidrófobas (que repelen el agua), importantes en ciertos procesos industriales, como el refino de metales, y en otros biológicos, como la motilidad celular. Los métodos tradicionales para crearlas se basan en tratamientos químicos; un ejemplo corriente es el papel encerado, sobre el que el agua formará gotitas.

Pero todas estas técnicas son muy delicadas y transitorias, excepto en entornos muy limpios. El ángulo de contacto entre la superficie y la gota de agua, que es lo que caracteriza el grado de hidrofobia, no puede incrementarse tampoco mucho más allá de 120 grados por medios puramente químicos. Para producir superficies extremadamente repelentes (con ángulos de contacto mayores de 120 grados) se necesitan nuevas técnicas.

Los métodos químicos se han visto complementados en el último lustro por una aproximación estructural. Se han conseguido gotas de agua con ángulos de contacto de hasta 175 grados en superficies rugosas. El agua no puede penetrar en los huecos microscópicos de las rugosidades porque la presión requerida es demasiado grande, de modo que la gota no está en contacto más que con una pequeña parte del sólido, como si fuese un faquir sobre una cama de clavos, y el ángulo real de contacto se hace grande.

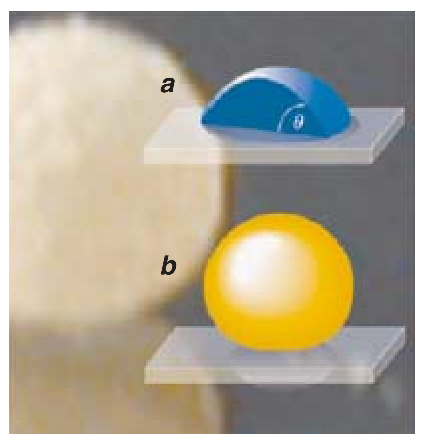
Aussillous y Quéré han dado un tumbo ingenioso a estas ideas, añadiendo una gota de agua a polvos de esporas del musgo *Lycopodium* recubiertas de silano, agitando luego la mezcla hasta que se forman gotas mixtas casi esféricas. Las gotas recubiertas de este polvo no mojan, hasta el punto de que las canicas resultantes incluso flotarán en el agua, al tiempo que se comportan como un sólido flexible. Su elasticidad deriva de la tensión superficial, pudiendo botar y rodar sin deshacerse.

La propiedad más destacada de estas canicas líquidas es su escasa influencia sobre la superficie subyacente. La mayoría de los líquidos mojan parcialmente, como le sucede al agua vertida sobre cristal pulido, predominando los influjos entre sólido y líquido, lo que origina un ángulo de contacto pequeño (*véase la figura 1a*). La geometría del contacto de los líquidos que no mojan es completamente diferente, porque el ángulo de contacto es de 180 grados



y la forma de la gota recuerda la de una esfera aplanada (*figura 1b*). Investigaciones teóricas previas de gotas que no mojan predecían comportamientos que resultaban insólitos y discutibles, pero la dificultad de conseguir superficies perfectas impidió que la teoría se comprobara cualitativamente. Aussillous y Quéré usan sus canicas líquidas para demostrar que estos prístinos sólidos flexibles se comportan de forma inusual.

La teoría nos dice que el tamaño de la zona de contacto de las canicas líquidas estáticas se determina por el equilibrio entre la gravedad (que favorece el contacto) y las fuerzas capilares (que se oponen a él). La geometría del contacto también determina lo que ocurre cuando las canicas empiezan a moverse. Una gota que no moja puede rodar sin deslizarse por una superficie que tenga una ligera inclinación, casi como lo haría una esfera. Las gotas que mojan parcialmente pueden permanecer fijas incluso sobre un cristal vertical. Cuando se mueven lo hacen deslizándose más que rodando, puesto que su movimiento está gobernado por la forma de cuña de la superficie de separación sólido-líquido de la figura 1a.



1. Gotas que mojan y que no mojan. a. *Una pequeña gota que moja parcialmente una superficie sólida tiene un ángulo de contacto finito theta, determinado por el comportamiento del sistema gas-líquido-sólido. La forma de cuña de la zona de contacto determina tanto la dinámica como la estática de estas gotas que mojan parcialmente.* b. *Las gotas que no mojan tienen un ángulo de contacto real de 180 grados y parecen esferas aplastadas. Estas canicas líquidas tienen una geometría de contacto diferente, por lo que sus propiedades estáticas y dinámicas son distintas*

¿Qué les ocurre a las gotas que no mojan cuando se mueven por un plano ligeramente inclinado? La velocidad de las canicas que ruedan está determinada en última instancia por la oposición entre la gravedad, que actúa sobre la masa y la acelera, y la disipación del fluido interno en la zona de contacto, que la frena. La teoría predice y los experimentos con canicas líquidas han confirmado que las gotas mayores ruedan más despacio que las pequeñas. Este resultado aparentemente paradójico tiene una sencilla explicación, a saber, que las gotas más grandes tienen una zona de contacto mayor y que crece más rápidamente que el volumen (masa) cuando el tamaño de la gota aumenta. La consecuencia es que las gotas pequeñas deberían rodar más rápido que las mayores, siempre que unas y otras conserven la forma casi esférica.

El comportamiento de las canicas líquidas es todavía más llamativo cuando se mueven rápidamente. Si la superficie sobre la que reposan se inclina con un gran ángulo, la gotita empieza a girar rápidamente y se transforma en un disco con forma de rueda, dotado de una fina depresión central, que recuerda a los anillos planetarios. Las fuerzas de inercia debidas a la rotación pueden deformar considerablemente las gotas a estas grandes velocidades. La posibilidad de tales deformaciones hizo que Poincaré y Lord Rayleigh estudiasen hace más de un siglo el comportamiento de formas toroidales en rotación libre.

Estudios posteriores pusieron de manifiesto que tales configuraciones son inestables. La presencia del plano inclinado parece ser suficiente para estabilizar la rueda giratoria en el presente caso, pero deja de ser estable y se transforma rápidamente en un sólido con forma de cacahuete tan pronto como abandona el plano o se levanta sobre él. Si se observan con atención instantes sucesivos se puede seguir la evolución de la inestabilidad (*véase la imagen superior*), aunque todavía no se puedan explicar los detalles del mecanismo de estabilización.

Este sencillo método de fabricar gotas que giren libremente fomentará la realización de experimentos en la superficie de la Tierra sobre este antiguo problema, complementando los que se han realizado en el espacio en ausencia de gravedad.

La facilidad con la que estas gotas se pueden producir y mover, junto con las velocidades relativamente grandes que pueden alcanzar, hacen adecuado su uso en micromáquinas mecánicas rápidas sin rozamiento, tales como impulsores y válvulas electromecánicas. Otra posible aplicación sería en lubricación, bien como cojinetes líquidos individuales o en emulsión confinada. Pero antes de que tales aplicaciones se puedan llevar a la práctica es necesario resolver algunas cuestiones previas, tales como las relativas a la robustez de las gotas y a los cambios que sufra su comportamiento con el paso del tiempo.

Terminemos observando que no hay que ir muy lejos para encontrar situaciones propicias a la producción de estas canicas líquidas. Las hojas de plantas como el loto tienen muchas protuberancias ligeramente separadas, rígidas y enceradas, al tiempo que son muchas las superficies biológicas que presentan vellosidades; una combinación de química y de organi-

zación estructural mantiene las superficies secas (y limpias) minimizando el área real expuesta a los contaminantes. Los ambientes húmedos y sucios deberían favorecer también la formación de gotas que no mojan, que pudieran desempeñar un cierto papel en el transporte de polvo. Correlatos de las canicas líquidas pudieran tener relevancia en biología celular, pues las células que se adhieren a veces se mueven rodando. Por lo que se refiere al mercurio, su apariencia es engañosa, puesto que sus gotas mojan un tanto, aunque si se las mezclase con algo de polvo puede que se aproximasen a la perfección. Lo que es evidente es que queda todavía mucho que aprender de una pequeña gota, si se la observa con los maravillados ojos de un niño.

L. MAHADEVAN
Departamento de Matemáticas Aplicadas y Física Teórica
Universidad de Cambridge

La doble personalidad de los neutrinos

Los neutrinos son partículas subatómicas únicas. No tienen carga eléctrica, viajan esencialmente a la velocidad de la luz y los hay de tres tipos: el neutrino electrónico, el muónico y el asociado al leptón tau. Se trata de partículas tan elusivas que uno no se da cuenta de los cien mil millones de ellas que cada segundo atraviesan la superficie de la uña de un dedo procedentes del Sol. El "misterio de los neutrinos solares" empezó en 1968, cuando un experimento pionero encontró menos neutrinos solares de tipo electrónico que los que predecía un modelo detallado de cómo brilla el Sol (y de cuántos neutrinos se deben detectar). Se discutieron mucho dos posibilidades: o bien el modelo del Sol estaba equivocado o algo les sucedía a los neutrinos en su camino hasta la Tierra.

En los años ochenta y noventa varios equipos internacionales de científicos realizaron una serie de experimentos subterráneos encaminados a resolver este misterio. Tales trabajos proporcionaron pruebas circunstanciales de que, en el camino hacia la Tierra, algunos neutrinos solares cambiaban del tipo electrónico, el que se produce en el Sol, a otro tipo más difícil de detectar. Pero no había una prueba clara de tales cambios de personalidad de las partículas, lo que se conoce usualmente como las oscilaciones de los neutrinos. Esta situación ha cambiado drásticamente en junio del presente año, cuando los investigadores que trabajan en Canadá anunciaron que habían resuelto el misterio: "El Observatorio de Neutrinos de Sudbury (*Sudbury Neutrino Observatory*, SNO) ha encontrado que la solución no está en el Sol, sino en los neutrinos, que cambian su naturaleza mientras viajan del núcleo del Sol a la Tierra".

El SNO es un estudio en el que colaboran 113 investigadores de 11 universidades y laboratorios de Canadá, los Estados Unidos y el Reino Unido, que utiliza unas instalaciones enterradas a más de 2 km de profundidad, dentro de una mina activa de cobre y níquel, que tienen el tamaño de un edificio de diez pisos. Allí su detector subterráneo está apantallado de los rayos cósmicos y de la contaminación radiactiva del polvo. El laboratorio está tan inmaculadamente limpio que todo el polvo que hay en él cabe en una cucharilla de té. Se construyó un detector esférico de 12 metros de diámetro, que contiene mil toneladas de agua pesada (D_2O) y que está inmerso en una cavidad de 30 metros de diámetro llena de agua normal (H_2O). Muy raramente el agua pesada detecta los neutrinos del Sol (unos cinco por día), produciendo una luz que se mide mediante 10 000 fotomultiplicadores.

Los resultados iniciales del SNO no detectaron más que neutrinos electrónicos. Un experimento americano-japonés conocido como Super-Kamiokande puede detectar los tres tipos de neutrinos, pero también es más sensible a los electrónicos y no puede distinguir un tipo de otro. Usa H_2O pura en un detector subterráneo situado al norte de Japón.

SNO y Super-Kamiokande medirían el mismo número de neutrinos si los únicos que llegaran a la Tierra procedentes del Sol fuesen los electrónicos, mientras que si hubiese también neutrinos asociados al muon o al tau, Super-Kamiokande mediría un número mayor. Y lo que sucede en la realidad es que el número de Super-Kamiokande supera al del SNO con una probabilidad de 99,96 % (3,3 desviaciones estándar), calculando de manera conservadora. Esto es una prueba definitiva.

El Sol emite neutrinos con un amplio abanico de energías, pero la sensibilidad de SNO y Super-Kamiokande se limita a un rango determinado. Usando datos de ambas medidas, los científicos del SNO calcularon el número total de estos neutrinos solares que llegan a la Tierra, número que concuerda bien (dentro de 0,3 desviaciones estándar) con la predicción del modelo estándar solar.

¿Qué significa todo ello? Dos científicos rusos propusieron por primera vez en 1969 que las oscilaciones de los neutrinos son la causa de la discrepancia observada entre los números de neutrinos solares predichos y los medidos. Los experimentos del detector del Super-Kamiokande proporcionaron en 1998 la primera prueba de que los neutrinos oscilasen, lo que se consiguió estudiando los neutrinos producidos cuando los rayos cósmicos se ponen en contacto con la atmósfera terrestre. SNO ha confirmado ahora que los neutrinos solares sufren una oscilación.

El Sol no produce más que neutrinos electrónicos mientras que de él nos llegan algunos asociados al muon o al tau. La conclusión es que los neutrinos solares tienen que saltar de un tipo al otro. Este fenómeno, que requiere que los neutrinos tengan una masa no nula, no es predicho por la versión más simple de la teoría de las interacciones débiles entre las partículas, que es la presentada en los libros de texto y se conoce como teoría electrodébil. Esta teoría ha de ser modificada ligeramente, lo que es importante pero no inesperado. Más importancia tiene la manera específica en que oscilen los neutrinos, que se deberá determinar mediante futuros experimentos y que podrá ayudar a determinar la dirección en que deban generalizarse las teorías físicas actuales.

Los neutrinos contribuyen a la densidad de masa del universo. Combinando los resultados de las masas de los neutrinos del SNO, del Super-Kamiokande y de experimentos de física nuclear se llega a la conclusión de que los neutrinos del electrón, del muon y del tau contribuyen entre el 0,1 % y el 18 % a la densidad de masa crítica del universo. El valor más plausible es el 0,1 %. Una densidad de masa de los neutrinos del 0,1 % es probablemente demasiado pequeña como para influir significativamente en la geometría o en el destino del universo, pero es aproximadamente una cuarta parte de la densidad de masa de todas las estrellas que observamos. A pesar del enorme número de neutrinos que hay en el universo, la pequeña cantidad de masa que aportan no va a resolver, pues, el problema de la materia oscura “faltante”.

Puede que el resultado más espectacular del SNO sea que el número total de neutrinos solares medido por su observatorio y por el Super-Kamiokande coincida con el predicho por el modelo solar estándar. El valor predicho es $5{,}05 \pm 0{,}2$ y el valor medido inferido por la comparación de los resultados del SNO y del Super-Kamiokande es $5{,}44 \pm 1{,}0$, en las unidades apropiadas. Se trata de un triunfo de la teoría de la evolución estelar. El número de neutrinos predicho depende de la potencia vigesimoquinta de la temperatura central del Sol. El hecho de que pueda predecirse correctamente el número de neutrinos con un 20 % de margen implica que se puede calcular la temperatura central del Sol (15,7 millones de Kelvin) con una precisión mejor que el 1 %. El gran uso que de la teoría de la evolución se hace para interpretar las observaciones de las estrellas y de las galaxias hace que esta concordancia sea motivo de regocijo para los astrónomos.

Los físicos están contentos porque tienen un fenómeno interesante que estudiar y los astrónomos también lo están porque su teoría solar ha demostrado ser correcta, pero el trabajo no ha hecho más que empezar. Hasta ahora no se han hecho medidas detalladas más que del 0,005 % de los neutrinos que los astrónomos creen que son emitidos por el Sol. El resto tiene menores energías, de manera que son más difíciles de detectar. Hasta que también éstos hayan sido observados y comparados con la teoría, no se puede estar seguro de que realmente se entiendan los entresijos del misterio de los neutrinos faltantes. El SNO y el Super-Kamiokande tienen que seguir haciendo medidas adicionales de transcendental importancia. Es una gran época para participar en la investigación de los neutrinos.

JOHN N. BAHCALL
Instituto de Estudios Avanzados
Princeton, New Jersey (EE.UU.)

De cerca

Texto y fotos: Sergi Rossi

Epibiosis

La epibiosis es un recurso utilizado por determinados animales y plantas sésiles (es decir, que desarrollan su vida adheridos a un lugar), los cuales se sirven de otros animales y plantas como substrato de asentamiento. Es un recurso vital muy extendido tanto en el medio terrestre como en el acuático, no debiendo confundirse con el parasitismo, en cuyo caso el organismo no sólo encuentra apoyo sino que se alimenta del substrato vivo. La "práctica" de la epibiosis no suele ser de todos modos beneficiosa para el anfitrión.

El medio marino bentónico puede considerarse como el paraíso de la epibiosis, dadas las limitaciones del espacio en el que se puede vivir. Todo lo que no sea convenientemente defendido (con sustancias tóxicas, antimitóticas, etc.) es objeto directo del asentamiento y desarrollo de epibiontes. Así, por ejemplo, una gorgonia como *Leptogorgia sarmentosa* que tenga partes necrotizadas será rápidamente colonizada por algas, hidrozoos o briozoos. Para los recién llegados este antozoo es una plataforma perfecta para poder aprovechar mejor las corrientes que les aportarán nutrientes y comida.

Otros organismos llevan con más parsimonia la epibiosis, como los crustáceos, e incluso la aprovechan para camuflarse de posibles depredadores.

Los epibiontes tienen en algunos casos preferencias a la hora de elegir dónde asentarse; así los hidrozoos se colocan en la parte superior del cangrejo *Bathynectes piperitus*, donde sus delicados pólipos no sufrirán daño por roce, mientras que briozoos y poliquetos (que poseen exoesqueletos calcáreos) colonizan con preferencia las partes inferiores del animal, en las cuales se ven además favorecidos por el "microclima" de corrientes y de alimento disponible.

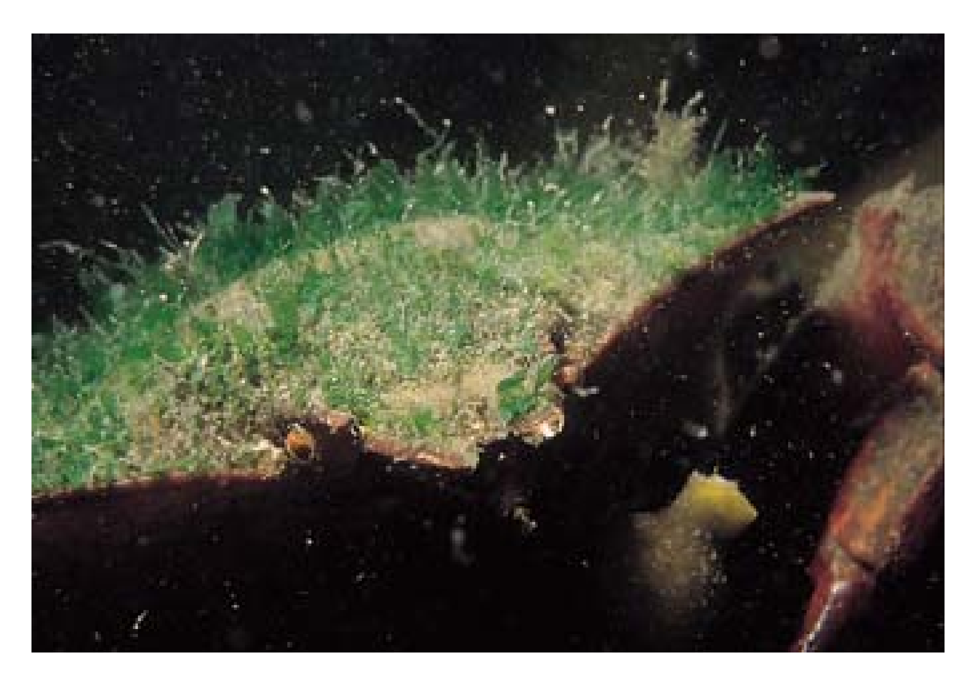
En algunos casos la epibiosis puede degenerar en parasitismo, como sucede con el antozoo *Parazoanthus axinellae*, que aprovecha los huecos dejados por las esponjas para asentarse, para alimentarse y para crecer protegido por el porífero. La carencia de espacio que se da en el bentos provoca ingeniosos mecanismos evolutivos para perpetuar las especies.



1. Algunos epibiontes han desarrollado tal grado de especialización por el substrato a colonizar que sólo se encuentran sobre un tipo de organismo. Es el caso del hidrozoo Sertularia perpusilla, *que habita sobre la fanerógama* Posidonia oceanica



2. Alga epibionte de alga. Las algas de vida prolongada (Codium bursa) *suelen ser invadidas por otras de vida más efímera*



3. Los caparazones de los cangrejos suelen ser frecuentemente epibiontizados. La manera más común de librarse de los epibiontes es mudando el exoesqueleto



4. Gorgonia Leptogorgia sarmentosa *colonizada por el briozoo* Turbicellepora avicularis *y por otros epibiontes que aprovechan una posición elevada para alimentarse*

5. Parazoanthus axinellae *es un hábil colonizador de esponjas, aprovechando los huecos disponibles para asentarse y crecer*



Motores moleculares

Las máquinas microscópicas han de actuar en un mundo caótico. Como no se puede derrotar al caos, hay que tratar de aprovecharlo

R. Dean Astumian

AGAZAPADO ENTRE LAS RUINAS DE UNA CASA en el sudoeste de Londres, el protagonista de *La guerra de los mundos* se maravillaba de lo insólito de la técnica marciana:

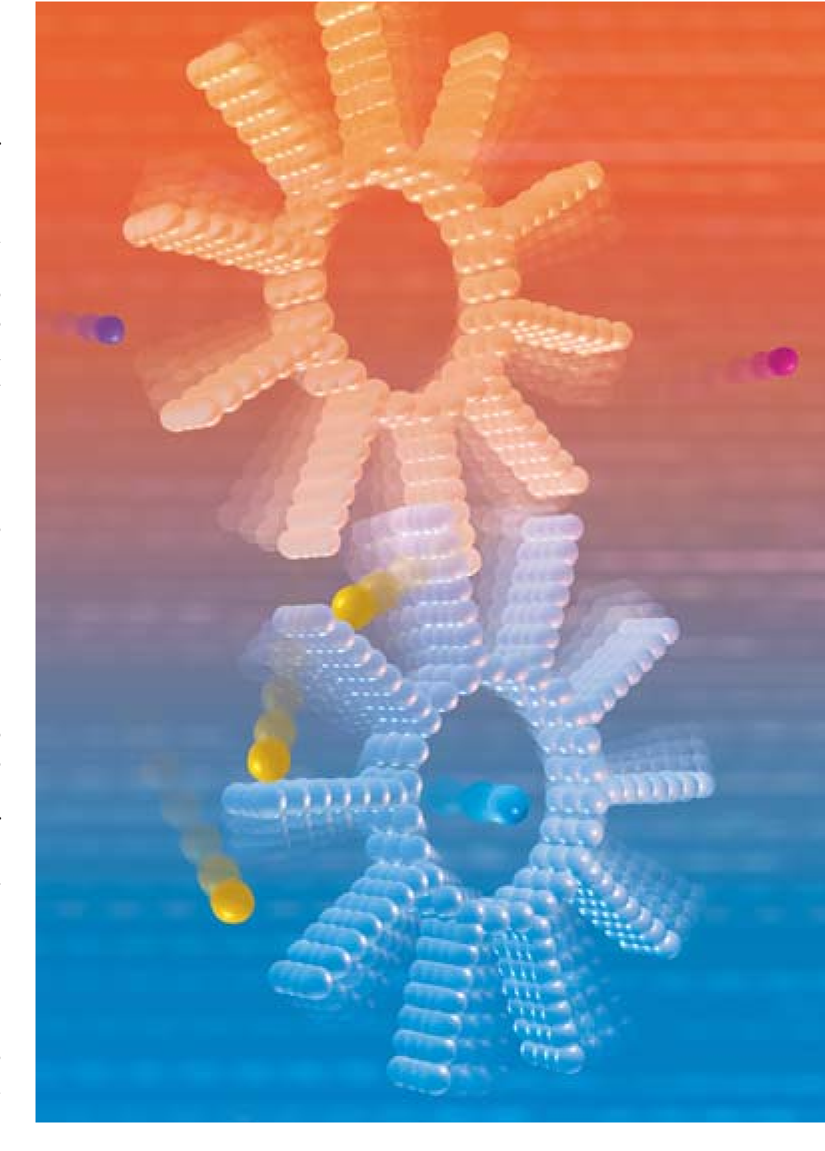
> Lo que más asombra a un ser humano cuando considera sus aparatos es el hecho curioso de que no aparezca en ellos el elemento predominante en nuestros mecanismos: la *rueda*.

Una técnica avanzada puede prescindir de las cosas que consideramos absolutamente esenciales. Esto es precisamente lo que ahora ocurre en un fecundo campo donde se entrecruzan la física, la química y la biología, en el estudio y la construcción de dispositivos que actúan como motores y bombas a escala molecular. Generalmente carecen de rotores, de armaduras y de todas las demás piezas de las máquinas corrientes, pero ésta no es su mayor rareza. En los motores ordinarios la energía se utiliza para producir movimiento, pero en estos nuevos motores se aplica energía para detenerlo. Aunque puedan parecer un ejemplo de técnicas extraterrestres, constituyen el tipo de motor más común en nuestro planeta, pues son la base de las operaciones interiores de todas las células vivas.

Nuestra intuición física, formada por la observación diaria de las grandes máquinas, falla al considerar el mundo de lo pequeño, caprichoso mundo gobernado por fluctuaciones térmicas y cuánticas. Seguir por medios deterministicos el movimiento de una molécula viene a ser como intentar caminar dentro de un huracán: las fuerzas que impulsan a una partícula por el trayecto deseado son exiguas en comparación con las fuerzas aleatorias que ejerce el entorno. Y sin embargo las células luchan. Transportan materiales, bombean iones, construyen proteínas, se mueven de acá para allá. Sacan orden de la anarquía.

En los últimos años se ha empezado a entender cómo puede ser esto. La idea básica, vagamente descrita como el principio del torniquete browniano, es que puede lograrse que el ruido aleatorio sea útil. El quid está en rectificar el ruido y filtrar sus componentes aleatorios de tal manera que sólo quede lo que se desea. Este principio se asemeja al fenómeno denominado sincronización estocástica, por el cual un aumento del ruido en un canal de comunicación puede realmente facilitar la transmisión de una señal [*véase* "Las virtudes del ruido de fondo", de Frank Moss y Kurt Wiesenfeld, INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, octubre de 1995].

Por medio de técnicas químicas se ha conseguido proyectar motores y dispositivos en miniatura capaces de manipular moléculas una por una. Estas diminutas máquinas imitan lo que los motores y las bombas de proteínas realizan en las células vivas, la conversión de la energía química en trabajo mecánico con un rendimiento cercano al 100 por ciento, y podrían llevar a cabo tareas como el ensamblado molecular, el cribado fino, la computación de bajo consumo y el control de calidad de semiconductores. Significarían así el primer paso para convertir en verdadera ciencia la ficción científica de la nanotécnica, el sueño del manejo átomo por átomo de la materia.



Frenar en marcha

Ni la granizada más temible se aproxima al tempestuoso bombardeo que es propio del mundo molecular, pero sus efectos pueden asemejarse. Si alguien situase su coche al pie de una cuesta, parase el motor y dejase suelto el freno de mano, el coche no empezaría normalmente a subir por la rampa. Imaginemos ahora que el coche estuviese en el seno de una furiosa tormenta y que cada segundo lo golpeasen centenares de granizos, por todas partes y de un modo aleatorio. Cada impacto transmitiría al coche un pequeño impulso que lo haría desplazarse hacia delante o hacia atrás en minúsculas proporciones. La cantidad de movimiento media transmitida al coche sería cero, pero en cualquier intervalo de tiempo dado el coche se movería más en un sentido que en otro.

Hay un modo muy sencillo de aprovechar estos empujones erráticos. Basta con calzar las ruedas traseras con unas piedras, de manera que no pueda rodar hacia atrás, y esperar hasta que un nuevo impacto de granizo lo empuje hacia delante. Si después no se hiciese nada, el coche volvería pronto a retroceder, pero si enseguida se trasladasen las calzas a la nueva posición de las ruedas, el coche quedaría fijado allí. Este proceso repetido —trasladando las piedras cada vez que el coche avanza— permitiría recorrer una calle, incluso remontando una pendiente.

En esta situación ideal harían falta una vista muy aguda y reacciones rapidísimas para colocar las calzas bajo un pesado automóvil en medio de una tormenta. Por suerte puede lograrse el mismo efecto sustituyendo el freno normal por un torniquete, dispositivo que permite el movimiento en un solo sentido. Este mecanismo consta de una rueda dotada de dientes asimétricos y de un trinquete, pequeño brazo que se introduce entre los dientes de la rueda y la impide girar hacia atrás. El trinquete de un dispositivo de torniquete o de cremallera está sometido a la tensión de un resorte. Este simple mecanismo haría que el coche se moviese siempre hacia delante, aunque con exasperante lentitud, pues el número de bolas de granizo que actuaría no sería más que una pequeña fracción del total, concretamente aquellas cuya cantidad de movimiento fuese suficiente para vencer la fuerza ejercida por el resorte sobre el trinquete.

Una alternativa mejor sería dar a los dientes una forma oblicua en el sentido contrario y sustituir el trinquete con resorte por un pistón accionado por el pedal de freno. Si no se actúa el freno, el pistón se encuentra desacoplado y el coche es libre para trastabillar de un lado a otro. Pero al pisarlo, el pistón se acopla y bloquea el engranaje (y el coche) en una posición fija.

Este torniquete modificado eliminaría la necesidad de cuidadosas mediciones y de intervenciones inteligentes. El conductor no tendría más que sentarse en el coche y activar el freno. Debido a la oblicuidad

El autor

R. DEAN ASTUMIAN es profesor de física en la Universidad de Maine y anteriormente enseñó biofísica en la Universidad de Chicago. Ha escrito muchos artículos sobre motores y bombas moleculares. En 1987 recibió el premio Galvani de la Sociedad de Bioelectroquímica y es miembro de la Sociedad Americana de Física. También se ocupa de la mecánica estadística de la transducción de señales por las células vivas.

de los dientes del engranaje, el exceso de impacto trasero de algunas bolas bastaría para que el coche se desplazase hacia adelante lo suficiente para que el engranaje avanzase un diente; en cambio se necesitaría un número de impactos mucho mayor para hacerlo retroceder en esa misma medida. Esta asimetría garantiza que el coche avanzaría aun cuando el freno se activase y se desactivase aleatoriamente. Lo bueno del sistema es que no requiere sincronización alguna; nada parecido a la cuidadosa sincronización que exige un motor ordinario.

Promediados a lo largo del tiempo, los golpes del granizo no ejercen fuerza neta alguna sobre el coche. El vehículo se mueve hacia adelante gracias a la aplicación del freno, que obliga al pistón a introducirse entre los dientes asimétricos. Si se suprimiese cualquiera de los elementos —la asimetría de los dientes de la rueda, la fluctuación causada por los impactos o la energía externa suministrada al accionar el freno—, el mecanismo dejaría de funcionar.

Huelga decir que toda esta invención no es en absoluto aplicable a un vehículo real. Un cálculo grosero revela que bombeando el freno a un ritmo razonable no se conseguiría mover el coche a más de un kilómetro por hora, lo que equivale a alrededor de la décima parte de la longitud del coche por segundo. La fuerza máxima ejercida sobre el vehículo sería una millonésima de la fuerza de la gravedad, con lo que el coche sólo podría ascender una pendiente muy suave con suma lentitud.

Pero si el coche fuese muy pequeño —por ejemplo, del tamaño de una molécula grande— y estuviese sumergido en agua, el mecanismo resultaría mucho más eficaz (*véase el recuadro* “Frenos de luz”). La relación de las masas de una molécula de agua y de una proteína es aproximadamente igual a la que existe entre las masas de una bola de granizo y un automóvil. La diferencia es que las moléculas de agua chocan con la proteína muchos miles de millones de veces por segundo. Estas colisiones producen la bien conocida fluctuación que llamamos movimiento browniano. Lo que no es tan conocido es que mediante un micromecanismo de torniquete podría aprovecharse el movimiento browniano para convertir la energía que carece de dirección concreta en un movimiento dirigido. Una pequeña proteína podría alcanzar así una velocidad de un micrometro por segundo (más de 10 veces su tamaño), equivalente a 100 kilómetros por hora en un coche. El mecanismo de torniquete podría superar una fuerza de hasta 10 piconewton, que viene a ser casi un millón de veces la fuerza gravitatoria que actúa sobre una molécula.

Es asombroso que dos procesos aleatorios puedan combinarse para producir un efecto no aleatorio, pero es cierto. El físico Juan M. R. Parrondo de la Universidad Complutense de Madrid demostró recientemente que el mismo principio es aplicable a los juegos de azar. Cambiar de un juego a otro, siendo cada uno de ellos una opción perdedora, puede volver la suerte a nuestro favor (*véase el recuadro* “La paradoja del jugador”).

El largo brazo de la segunda ley

La primera reacción de un físico es que los dispositivos de torniquete podrían violar la segunda ley de la termodinámica, según la cual es imposible convertir las fluctuaciones térmicas erráticas en trabajo mecánico. Richard Feynman analizó un torniquete acoplado a una rueda de paletas en su famosa obra *Lectures on Physics*. Si el torniquete pudiera impedir que la rueda girase hacia atrás, las colisiones moleculares producirían una rotación de la rueda irregular pero incesante. Esto daría lugar a una máquina en movimiento continuo de la segunda clase, desafiando así la segunda ley antes citada. (El dispositivo no pretende producir energía partiendo de la nada, por lo que no infringe la primera ley de la termodinámica, la de conservación de la energía.)

Pero Feynman demostró que el artilugio no puede funcionar sin una fuente de energía externa. El trinquete debe presionar al torniquete por la acción de un resorte, en sí mismo sensible al ruido térmico. Alguna vez el ruido puede contraer el resorte, lo que haría levantar el trinquete y liberar el mecanismo prematuramente. Dada la asimetría de los dientes del engranaje, lo más probable es que

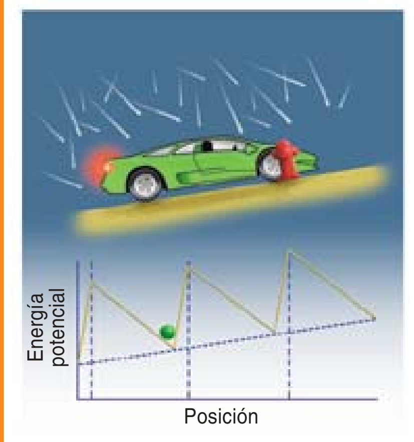
Resumen / Motores de moléculas

Para construir un motor molecular no basta con hacer una versión en miniatura de uno ordinario. Los investigadores han tenido que replantearse sobre qué fundamentos descansa la operación de un motor.

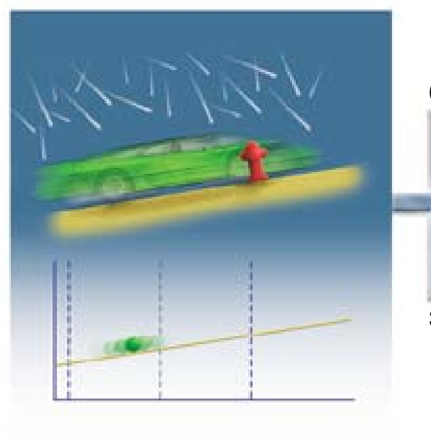
- La energía aportada produce el movimiento de los motores ordinarios. La entrada de energía restringe el movimiento de los moleculares. Deteniendo selectivamente los movimientos no deseados y dejando pasar los que se desean —mediante un mecanismo semejante a un torniquete—, el motor convierte las erráticas influencias ambientales en movimiento organizado.
- Podría parecer que los torniquetes sacasen algo de la nada, pero la segunda ley de la termodinámica no está de acuerdo con ello. El físico Richard Feynman explicó la total idoneidad de estos sistemas.
- Estos motores ponen a nuestro alcance muchos de los sueños de la nanotécnica, además de explicar cómo funcionan las células vivas en pleno caos del micromundo.

LUCHA CONTRA LA PENDIENTE

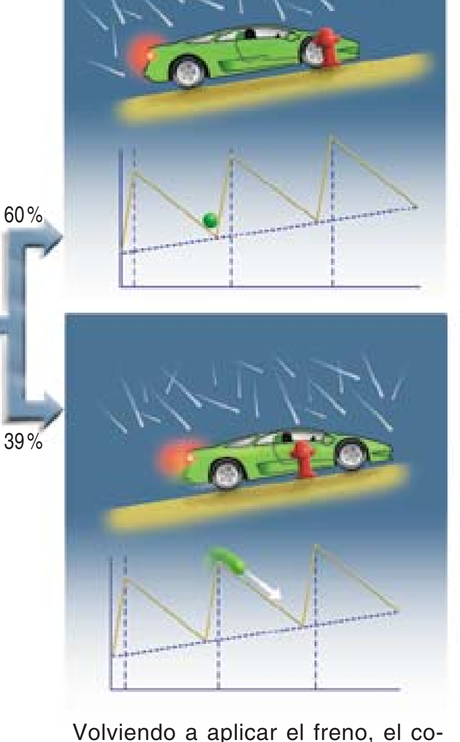
Conducir cuesta arriba sin motor es una metáfora adecuada para comprender los motores moleculares. Esto parece imposible, pero puede suceder si el coche va equipado con un freno de torniquete especial y lo bombardea el granizo. Desde el punto de vista de la energía potencial la cuesta puede representarse por una línea recta y el freno (cuando está aplicado) por un diente de sierra asimétrico.



Con el freno puesto, el coche está forzado a apoyarse en una entalladura del diente de sierra. No es probable que un impacto de granizo lo saque de esta posición de bloqueo. (Si alguno lo hiciera, el coche tendería a volver hacia atrás, que es el camino de menor resistencia para el torniquete.)



Con el freno quitado, los granizos azotan el coche y lo mueven de un lado a otro aleatoriamente. La probabilidad de alcanzar determinada posición puede calcularse a partir de la pendiente de la cuesta y del lapso de tiempo disponible. Pese a la tendencia a descender, es más probable que el coche rebase la posición del pico a su derecha que la del pico a su izquierda (*líneas de trazos*).



Volviendo a aplicar el freno, el coche retrocederá a donde empezó (probabilidad del 60 por ciento en este ejemplo), avanzará una entalladura (39 por ciento) o retrocederá una posición (1 por ciento, no representada).

éste retroceda una posición. Si la rueda de paletas y el trinquete estuvieran a la misma temperatura, las tendencias a moverse hacia adelante (por efecto de las colisiones moleculares) y hacia atrás (debido a la inseguridad del resorte) se compensarían exactamente. Pese a las apariencias superficiales, un engranaje en equilibrio térmico no girará.

Esta restricción no es aplicable cuando el sistema está fuera de equilibrio térmico. Si la rueda de paletas estuviese más caliente que el resorte, el torniquete giraría en sentido levógiro, como indica la intuición. Pero si lo más caliente fuese el resorte, la rotación sería dextrógira, movimiento que suelen impedir los torniquetes. Cualquier desvío del equilibrio permitirá un movimiento dirigido por el torniquete. Todo agente que cree desequilibrio suministrará energía al sistema. En el caso de un coche, la energía provendría del pie aplicado al freno. La energía se disiparía en calor cuando se forzase al coche a quedar en posición de bloqueo. Es así como estos sistemas cumplen la segunda ley de la termodinámica.

Aunque a nivel molecular sean raros los elevados gradientes térmicos, otras formas de desequilibrio son muy comunes. El químico orgánico T. Ross Kelly y sus colegas del Boston College desarrollaron hace tres años un ingenioso experimento sobre esta cuestión. Sintetizaron el torniquete de Feynman a partir del tripticeno, molécula orgánica en forma de Y que hace el papel de rueda de paletas, y del heliceno, molécula en G que actúa como trinquete y resorte. Debido al doblez que presenta el heliceno, resulta más fácil girar la rueda en el sentido dextrógiro que en el sentido contrario. Pese a tal asimetría, el espectroscopio NMR indicó que las frecuencias de las revoluciones dextrógiras y levógiras eran exactamente iguales, como Feynman había predicho.

Introdujeron entonces un proceso químico de no equilibrio: la hidrólisis, o descomposición regulada por agua del gas fosgeno. Se adhirió al trinquete un grupo hidroxialquilo y un grupo amino a una paleta de la rueda, actuando el conjunto a la manera de un freno. Cada vez que la paleta se aproximaba al trinquete, los grupos (preparados por el fosgeno) reaccionaban e impedían cualquier nueva rotación en sentido levógiro. El efecto neto conseguido fue la rotación dextrógira de la mayoría de las ruedas. Este sistema no es un

motor molecular auténtico —si el freno se libera y luego vuelve a aplicarse, la rueda tenderá a volver a su posición inicial—, pero sirve para exponer la idea. Otros investigadores han logrado la rotación continua empleando diferentes mecanismos de torniquete; por ejemplo, un equipo dirigido por Ben Feringa de la Universidad de Groningen utiliza la luz para excitar un motor molecular.

Bombear el freno

Las recientes experiencias indican que al menos hay algunas máquinas biológicas que responden a principios semejantes. Un ejemplo es la bomba de iones, una proteína que impulsa partículas con carga eléctrica a través de la membrana celular. Los iones fluyen naturalmente desde los potenciales electroquímicos altos a los bajos, pero estas bombas pueden hacer que circulen en el sentido opuesto, manteniendo los gradientes electroquímicos esenciales para la vida.

La bomba iónica parece estar basada en un dispositivo más sencillo, el canal de iones. Este viene a ser un rectificador biológico, pues permite que la corriente eléctrica circule en un solo sentido. El canal típico es una proteína en forma de embudo de unos 10 nanómetros de longitud, dentro del cual los iones pueden moverse desde la embocadura a la punta, pero no en sentido opuesto. Convertir este rectificador en una bomba requiere algún mecanismo para modular el tamaño de la embocadura y la intensidad del influjo de un ion dentro del canal. La forma del canal es muy adecuada para este tipo de modificación, puesto que actúa como una palanca: un pequeño desplazamiento de los átomos cerca de la punta del embudo puede producir un cambio notable en la embocadura. Al abrir y cerrar cíclicamente la embocadura, el bombeo puede trasladar iones desde la punta hacia el exterior de la base, igual que al pisar el freno del coche el engranaje giraba en el sentido contrario al que podía esperarse.

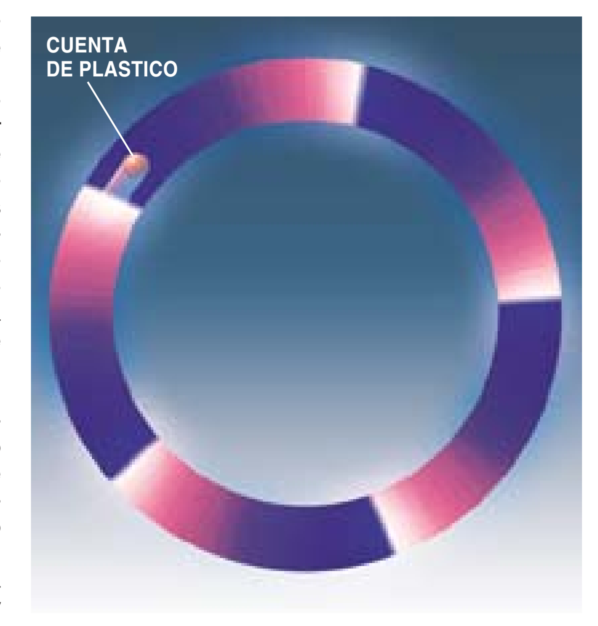
La hidrólisis del adenosín trifosfato (ATP), sustancia que actúa como combustible celular, es la que proporciona el mecanismo necesario para convertir el canal en bomba. Simplificando la descripción, la bomba tiene dos estados posibles. En el primero, la embocadura está abierta hacia la célula y los iones interactúan intensamente con el interior del canal. En el segundo estado, la embocadura está cerrada y los iones interactúan débilmente con el interior. La adhesión del ATP favorece el primer estado, mientras que la libe-

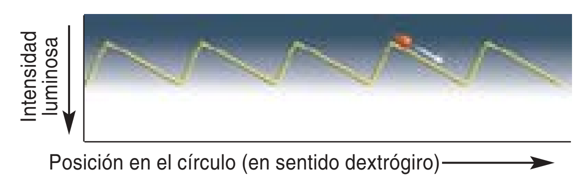
FRENOS DE LUZ

Por raro que parezca, un coche gobernado por el freno es exactamente análogo a un motor molecular rudimentario. Un elegante experimento realizado hace siete años por J. Albert Libchaber y sus colaboradores utilizó como "coche" una cuenta de plástico de tamaño micrométrico que flotaba en una cubeta de agua. Manipularon la diminuta cuenta por medio de haces de luz, de tal modo que la sutil presión de la luz refractada a través de la cuenta la empujase hacia regiones en las que era mayor la intensidad luminosa. El haz de luz creaba un círculo —la "carretera"— dentro del cual solía quedar confinada la cuenta. Un segundo haz superpuesto al anterior —el "freno"— podía activarse o desactivarse. El haz de freno creaba series alternadas de regiones brillantes y oscuras, en las que no estaban regularmente separadas las posiciones de intensidad máxima y mínima (*derecha*). Girando en sentido dextrógiro a partir de un máximo, el mínimo siguiente estaba cerca, pero en sentido opuesto distaba un largo trecho. Esta asimetría es comparable a la oblicuidad de los dientes del engranaje en un torniquete mecánico.

Con el haz de freno aplicado, la cuenta se movía en la dirección de intensidad creciente. Al alcanzar el máximo siguiente, permanecía allí mientras estuviera puesto el freno. Al quitar el freno, la cuenta vagaba erráticamente por el círculo. Si conseguía atravesar un mínimo, la aplicación del freno en ese momento la empujaba al máximo siguiente. Debido a la asimetría, era más probable que el movimiento fuera dextrógiro. La velocidad neta de la cuenta dependía de la frecuencia con que el haz se activaba y desactivaba. Al aumentar esa frecuencia también lo hacía la velocidad, hasta alcanzar el punto en el que el movimiento browniano ya no podía competir.

Como en el ejemplo del coche, el sistema no requiere durante su operación mediciones, ni "coreografía", ni aplicación de inteligencia. Funcionaba incluso activando y desactivando el haz de freno aleatoriamente.





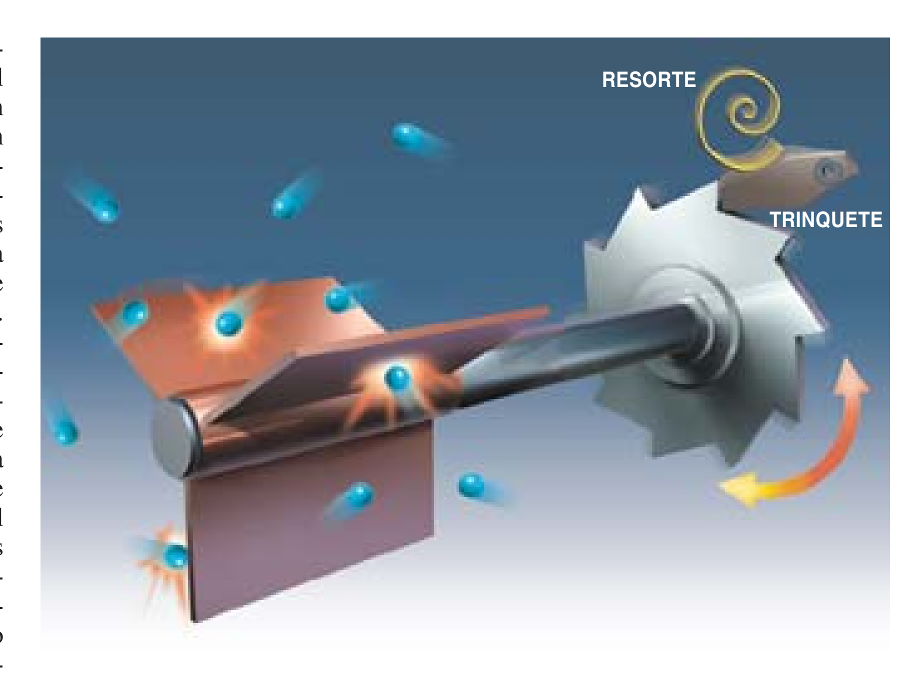
ración de los productos de la hidrólisis favorece el segundo. El proceso es análogo a la operación de una esclusa de canal, mas con una diferencia crucial: no se requiere ningún mecanismo de control para sincronizar la hidrólisis con el movimiento iónico. Basta con recorrer ciclos aleatorios de uno a otro estado de la proteína. Cuando la compuerta hacia adentro está abierta y el nivel de energía del canal es bajo, el ion penetra naturalmente al canal desde el interior. Si la compuerta hacia adentro está cerrada y el nivel de energía es elevado, el ion sale al exterior. A mediados de los años ochenta esta representación fue corroborada por varios investigadores, entre ellos Tian Tsong y yo mismo. Aplicando un campo eléctrico alterno a una bomba iónica, se observó que dirigía iones hasta remontar un gradiente electroquímico, aun sin la hidrólisis del ATP.

Otro ejemplo es la quinesina, una especie de horquilla elevadora de moléculas que transporta proteínas por el interior de la célula. La quinesina consta de dos dominios débilmente acoplados y se desplaza a lo largo de un trayecto denominado microtúbulo, compuesto por gran número de moléculas individuales de la proteína tubulina, de 10 nanómetros de longitud cada una. El potencial eléctrico entre la quinesina y el microtúbulo suele presentar una configuración en diente de sierra, con barreras energéticas que impiden que la quinesina se desplace desde una molécula de tubulina a la siguiente. Según el modelo browniano, la hidrólisis de una molécula de ATP cambia la distribución de potencial a una forma plana y permite colisiones aleatorias que hacen avanzar la quinesina. La liberación de los productos de la hidrólisis devuelve al potencial su forma en diente de sierra, lo cual, dependiendo de dónde haya llegado la quinesina, puede impulsar hacia adelante la molécula.

Este modelo browniano del movimiento de la quinesina difiere radicalmente del tradicional, en el que la forma de la molécula desempeñaba el papel esencial. La idea era que los dos dominios, actuando como brazos, soltaran uno cada vez el microtúbulo y se balancearan hacia adelante, como si estuvieran avanzando por las barras fijas de un gimnasio. La teoría predecía claramente que, si se suprimía un dominio, la molécula resultante no sería capaz de desplazarse a lo largo del microtúbulo. Yasushi Okada y Nobutaka Hirokawa sustituyeron en 1998 uno de los dominios por un bucle cargado de aminoácidos, de manera que la molécula tuviera una forma diferente pero casi idéntica energía de adhesión. Esta molécula se movía aproximadamente con tanta rapidez como la quinesina normal de dos brazos, lo que venía a confirmar el modelo browniano.

También puede intervenir el movimiento browniano en los motores biomoleculares que forjan nuestros músculos (*véase el recuadro* “Musculación”), ensamblan proteínas, sintetizan el ATP, abren y cierran el ADN, transportan proteínas a través de las membranas de nuestras células y descomponen las proteínas cuando ya no son necesarias. En algunos casos las apariencias son engañosas y todavía se debate sobre lo que realmente sucede. Pero algo sí que está claro: toda máquina microscópica tiene que trabajar a favor o en contra del movimiento browniano y la primera alternativa parece ser la preferida.

El principio browniano del torniquete ofrece a científicos e ingenieros un modo enteramente nuevo de manipular la materia a escala muy pequeña. Una de sus primeras aplicaciones ha sido la de separar partículas por su peso. El proceso es la versión microscópica del lavado de pepitas de oro. Cuando las partículas se someten a fluctuaciones erráticas —ya sea al sacudir una bandeja o al imprimir un movimiento browniano— las más pesadas se mueven más despacio. Los primeros pasos hacia la construcción de tamices brownianos los dieron hace nueve años los físicos Armand Ajdari y Jacques Prost. Joel



1. EL MECANISMO DE TORNIQUETE estudiado por Richard Feynman demuestra que el bombardeo aleatorio puede inducir un movimiento no aleatorio. Las moléculas de gas que inciden en la hélice hacen que gire la rueda dentada, pero ¿en qué sentido? Si el trinquete provisto de resorte —el brazo que bloquea la rueda— funciona correctamente, la rueda sólo puede girar hacia la izquierda. Pero cuando el ruido térmico hace que el resorte se libere y vuelva a operar, la rueda tenderá a girar a derechas por la asimetría de los dientes. Este efecto predomina siempre que se aplique más calor al resorte que al gas.

Bader y sus colegas han elaborado recientemente un dispositivo para clasificar moléculas de ADN. Su método promete conseguir una precisión y selectividad mayores que las técnicas de clasificación normales, como la electroforesis, el centrifugado y la destilación.

En todos los ejemplos anteriores el campo eléctrico sobre el torniquete está activado (*on*) o desactivado (*off*). Pero Martin Bier y yo propusimos en 1996 que se utilizasen tres estados: positivo, negativo y desactivado. Conmutando entre ellos, un tamiz browniano conseguiría que las partículas pesadas se movieran de una manera y las partículas ligeras de otra. Podrían inyectarse continuamente partículas en la zona media del dispositivo y recogerse a uno y otro extremo, para luego volver a inyectarse en otro dispositivo gra-

LA PARADOJA DEL JUGADOR

La aparente paradoja del torniquete browniano —la basculación de un sistema entre dos estados que separadamente pierden energía puede permitir que el sistema la gane— es también aplicable a los juegos de azar. El pasado año el físico Juan M. R. Parrondo de la Universidad Complutense de Madrid y el ingeniero Derek Abbott de la Universidad de Adelaida en Australia presentaron un par de juegos de monedas que ilustran esta paradoja [*véase* "Juegos matemáticos" en INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, julio 2001]. Jugando uno u otro por separado, se tiende a perder, pero si se pasa de uno a otro aleatoriamente se llega a ganar. El quid de la cuestión está en que hasta un juego perdedor deja ganar alguna vez. Y cambiando de juego se aseguran esas ganancias antes de que se las lleve la inevitable pérdida.

Aunque el juego de Parrondo y Abbott utilice monedas marcadas, otros ejemplos requieren solamente una moneda normal y un par de dados imparciales (no cargados). Consideremos, por ejemplo, un juego que combine dados con fichas de damas. Para jugar se desplaza una ficha por una fila de un tablero de damas. Lo que se pretende es arrancar a la mitad y llegar al extremo derecho antes que al extremo izquierdo (*abajo*). El jugador mueve la ficha hacia adelante o hacia atrás tirando un par de dados y consultando una tabla de reglas adecuadas al caso. Si utiliza una u otra de las dos tablas de reglas aquí expuestas —idénticas salvo en haberse invertido los papeles del blanco y del negro—, el jugador tiende a perder. La probabilidad relativa de ganar es igual al número de maneras distintas de avanzar del blanco al negro multiplicada por el número de maneras de avanzar del negro al blanco (8×2). Para perder hay que retroceder dos veces seguidas (5×4). En consecuencia, para una u otra tabla de reglas el jugador puede esperar ganar 80 veces por cada 100 veces que pierda.

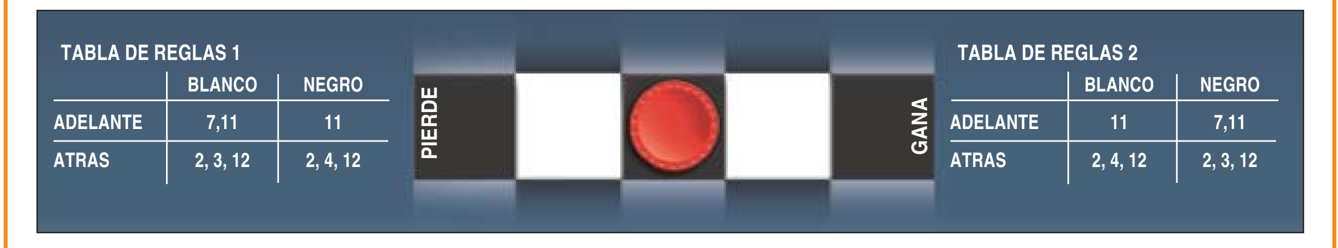
Supongamos ahora que echamos a cara o cruz una moneda antes de cada jugada. Si sale cara, escogeremos jugar según la primera tabla de reglas y, si sale cruz, jugaremos con la segunda. La probabilidad de ganar será ahora el producto de los números promedio de jugadas de avance, $(8 + 2)/2 \times (8 + 2)/2 = 25$. La probabilidad de perder será el producto de los números promedio de jugadas de retroceso, o sea $(4 + 5)/2 \times (4 + 5)/2 = 20{,}25$. El jugador puede esperar ganar de este modo 100 veces por cada 81 veces que pierda.

En este juego los dados simulan el ruido térmico, las probabilidades desfavorables en cada juego representan la fuerza impulsora global y la moneda al aire actúa como la entrada aleatoria de energía. El juego presenta asimetría: según la primera tabla de reglas la ficha tiende a estar más veces en un cuadro negro que en uno blanco, siendo al revés para la segunda. Al echar la moneda al aire se suprime esta asimetría.

Un cambio similar de la suerte se da en numerosos aspectos de la vida, lo que en estadística se denomina la paradoja de Simpson. Puede suceder siempre que las probabilidades de ciertos eventos sean constantes mientras que las de otros fluctúen. La probabilidad de moverse hacia atrás es casi constante en el ejemplo anterior, mientras que la de avanzar fluctúa dependiendo de la moneda lanzada al aire. Esta paradoja ha inducido a sacar conclusiones incorrectas de la mezcla de conjuntos de datos y puede hacer que los ingenuos se vean inducidos a inversiones y contratos de seguro poco honrados.

Consideremos, por ejemplo, una póliza de seguro que cubra tanto los huracanes (que tienden a ocurrir al final del verano y en otoño) como los terremotos (posibles en cualquier época del año). Ambos desastres ocurren con la misma tasa promedio en este sencillo ejemplo. Los ciudadanos de Florida y de California pagan una cuota mensual y, cuando sobreviene la catástrofe, las víctimas perciben una cierta parte del dinero que en ese momento está en el fondo. Los astutos habitantes de Florida podrían alegar que sus negocios son marcadamente estacionales, por lo que deberían pagar menos en otoño e invierno y, en compensación, más en primavera y verano. ¿Sería eso justo? Por mucho que sorprenda, no. La propuesta de Florida conseguiría engrosar el fondo durante la estación de los huracanes, con lo que tenderían a percibir mayores sumas que los de California. Aplicando reglas diferentes, los californianos avispados podrían tornar el juego a su favor.

EN ESTE JUEGO una ficha de damas se moverá en el sentido que determine la suma de lo que señalen los dos dados en cada tirada. La ficha se mueve con más frecuencia hacia atrás según ambas tablas de reglas, pero la conmutación aleatoria entre las reglas consigue invertir la tendencia.



duado a diferente masa, y así sucesivamente, mejorando siempre la separación en cada nueva etapa. Tales dispositivos podrían clasificar no sólo por masa, sino también por tamaño o por carga eléctrica. Teóricos de Princeton, de Chicago, del Instituto Técnico de Massachusetts y de la Universidad de Ottawa han desarrollado luego esta idea en dos dimensiones.

Hace dos años que Alexander van Oudenaarden y Steven Boxer construyeron un tamiz que funcionaba en dos dimensiones. Utilizando litografía de haz electrónico, grabaron en una lámina de vidrio una red de barreras asimétricas de 25 nanómetros de altura. Después rellenaron este diminuto laberinto con un fluido de moléculas de fosfolípidos eléctricamente neutras, mezcladas con otras de cargas eléctricas diversas, y aplicaron un campo eléctrico. Por la acción de ese campo las moléculas superaron la carrera de obstáculos. Dado que las moléculas de carga simple se movían más despacio que las de carga doble, tenían más tiempo para desviarse a los lados mientras cruzaban de una a otra barrera. La asimetría de las barreras facilitaba que las moléculas derivaran hacia una cierta dirección en vez de dispersarse por las buenas. Cuando las moléculas cargadas llegaban al otro extremo de la lámina, ya se habían ellas mismas clasificado en diferentes grupos según su carga.

El salto cuántico

Era sólo cuestión de tiempo que los torniquetes se introdujeran en el mundo cuántico. Hace cuatro años que Peter Hänggi y sus colegas de la Universidad de Augsburgo (Alemania) formularon una idea tentadora: los efectos cuánticos —interferencia entre las funciones de onda electrónicas, cuantificación de los niveles de energía, tunelización de electrones a través de las barreras— podrían aportar otra fuerza aleatorizadora. Estos efectos reemplazarían al movimiento browniano a las temperaturas más bajas y a escalas mínimas. Mediante un torniquete cuántico podría obtenerse una regulación precisa de los electrones individuales sin tener que ejercer una manipulación de precisión comparable sobre los campos eléctricos.



2. DOS TORNIQUETES que difieren en detalle pueden funcionar básicamente del mismo modo. En una oblea de silicio se graba un punto cuántico triangular de tamaño comparable a un micrometro, que actúa como diodo convirtiendo la corriente alterna en continua. El canal iónico —molécula de proteína que se representa recortada— es una versión biológica del diodo de volumen cien veces menor. Se cree que el perfil de la energía potencial de ambos dispositivos es idéntico.

Charles Marcus y sus colegas han construido posteriormente una bomba de electrones a partir de un punto cuántico, el cual actúa como un túnel entre dos grandes depósitos de electrones y puede ser cerrado mediante puertas electrostáticas. Variando cíclicamente la tensión del punto y de las puertas se hizo pasar uno a uno los electrones de un depósito a otro. Como su sistema siempre estaba próximo al equilibrio, el proceso era reversible, lo que permitía que el consumo de energía fuera arbitrariamente pequeño.

Imre Derényi y yo hemos especificado recientemente un mecanismo singular en el que los cambios de tensión serían bruscos y aleatorios. Este sistema sería intrínsecamente irreversible —la dirección en que se bombea un electrón no depende del orden de realización de las etapas— y por ello es más derrochador. Pero tendría sus ventajas, sobre todo como modelo de reacciones químicas irreversibles, cuales son las utilizadas para gobernar la bomba iónica. Otras aplicaciones posibles serían las bombas de electrones en ordenadores moleculares y la amplificación de señales a lo largo de conductores a escala molecular.

Heiner Linke y sus colegas utilizaban entre tanto puntos cuánticos triangulares. Los triángulos actuaban como torniquetes porque el estrecho vértice hacía más difícil el paso de los electrones. Cuando una tensión oscilante modulaba esta polarización intrínseca, circulaba una corriente neta, aun siendo cero la tensión media. El sentido de la corriente se regulaba variando la temperatura. A temperaturas altas el dispositivo funcionaba como torniquete térmico: los electrones tendían a salir por el vértice de los triángulos porque una vez fuera les era más difícil volver atrás. A temperaturas bajas se convertía en un torniquete cuántico: los electrones salían por la base de los triángulos por ser menor en ese sentido la anchura de la barrera energética, con lo que la tunelización era más rápida. Además de sus aplicaciones en electrónica, los torniquetes cuánticos podrían servir para amortiguar los remolinos de corriente que se crean en los superconductores, resolviendo así un gran problema de los imanes y los hilos superconductores.

Estas ideas nos llevan a completar un círculo. El movimiento browniano fue de enorme ayuda para demostrar la existencia de átomos hace un siglo. También dio explicación a las diferentes velocidades de las reacciones químicas por el equilibrio entre el ruido térmico, que agrupa entre sí las mo-

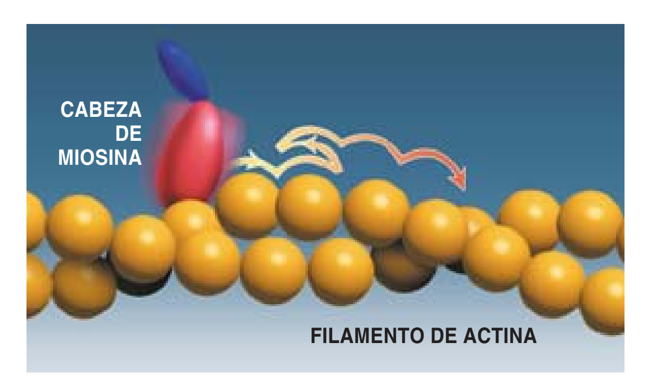
MUSCULACION por Toshio Yanagida

Un éxito inesperado de la teoría de los torniquetes brownianos ha sido dar una nueva explicación a la contracción muscular. Es sabido tiempo ha que la flexión muscular hace que se deslicen uno sobre otro filamentos de dos clases, constituidos por las proteínas miosina y actina. Las moléculas convierten la energía química —en forma de adenosín trifosfato (ATP)— en energía cinética con un rendimiento cercano al 50 por ciento. Este proceso opera aunque la energía química sea apenas más potente que el ruido representado por el calor ambiente. Las máquinas artificiales, como los motores eléctricos y los de los automóviles, trabajan por el contrario con energías muy superiores al ruido térmico. ¿Cómo pueden ser tan eficaces los motores moleculares?

Una teoría ya antigua sostiene que los músculos se contraen cuando una molécula de miosina divide una molécula de ATP, adquiere energía y cambia de forma. Al hacerlo tira de un filamento de actina en pasos discretos, como si subiera una escalera. El modelo sigue siendo popular por afirmar que la contracción muscular es, como el funcionamiento de los motores ordinarios, un proceso determinístico, fácil de entender. Pero el problema estriba en que un motor ordinario debe perder, y no ganar, rendimiento cuando disminuye de tamaño.

Para resolver esta contradicción se han desarrollado nuevas técnicas de manipulación de moléculas y de identificación de minúsculos movimientos y fuerzas, como el etiquetado fluorescente, una iluminación especial de corto alcance llamada campo evanescente, las trampas por láser y las sondas exploradoras. Nuestros esfuerzos finalmente dieron fruto hace cuatro años.

Hemos descubierto que la miosina y la actina no se comportan en realidad de un modo determinístico. La miosina salta estocásticamente longitudes de 5,5 a 27,5 nanómetros cada vez. Cada salto es un múltiplo de 5,5 nanómetros, que es la separación de las moléculas de actina en un filamento. El salto dado, cualquiera que sea su longitud, corresponde al consumo de una molécula individual de ATP. A veces la miosina salta hacia atrás más bien que hacia adelante. Estos hechos son difíciles de explicar por el modelo tradicional, pero concuerdan bastante con la teoría del torniquete browniano. Si bien quedan por contestar numerosas preguntas —por ejemplo, ¿cómo transforma exactamente el ATP el errático movimiento browniano en movimiento de avance?—, el esquema básico explica el gran rendimiento de las contracciones musculares: aprovechan el ruido en vez de intentar vencerlo.



EL MOVIMIENTO DE LA MIOSINA, esencial para la función de los músculos animales, muestra no sólo saltos hacia delante sino también hacia atrás y saltos múltiples, como era de esperar al estar gobernado por un bombardeo molecular aleatorio.

Toshio Yanagida, conocido por sus experimentos de biofísica, es profesor en la Facultad de Medicina de Osaka (Japón).

léculas, y la repulsión eléctrica, que tiende a separarlas. Los conceptos se filtraron a la biología como posible explicación del transporte biológico gobernado por reacciones químicas fuera de equilibrio. En nuestros días son los sistemas biológicos los que inspiran la concepción por síntesis química de bombas y motores moleculares, refinados tamices y rectificadores cuánticos. El flujo de las ideas se ha invertido y el progreso es cualquier cosa menos aleatorio. En el futuro próximo, siguiendo los cauces de la química más que los de la ingeniería mecánica, podríamos ver fábricas de tamaño micrométrico ensamblando piezas a escala nanométrica para motores que realicen cirugía microscópica, bombas para eliminar los desechos de fábricas (quizá también de nuestras propias células) y transistores para ordenadores moleculares que gobiernen estos y otros procesos. Igual que en *La guerra de los mundos* los marcianos terminan derrotados por humildes gérmenes, lo más pequeño puede acabar conquistando a lo más grande.

Bibliografía complementaria

LA SEGUNDA LEY. P. W. Atkins. Biblioteca Scientific American, Prensa Científica, 1992.

THERMODYNAMICS AND KINETICS OF A BROWNIAN MOTOR. R. Dean Astumian en *Science*, vol. 276, págs. 917-922; 9 de mayo de 1997.

A SINGLE MYOSIN HEAD MOVES ALONG AN ACTIN FILAMENT WITH REGULAR STEPS OF 5.3 NANOMETRES. K. Kitamura, M. Tokunaga, A. H. Iwane y T. Yanagida en *Nature*, vol. 397, págs. 129-134; 14 de enero de 1999.

WARMTH DISPERSES AND TIME PASSES: A HISTORY OF HEAT. Hans Christian von Baeyer. Random House, 1999.

PLAYING BOTH SIDES. Erica Klarreich en *The Sciences*, vol. 41, n.º 1, págs. 25-29; enero-febrero de 2001.

Para simulación de un torniquete básico visítese **monet.physik.unibas.ch/~elmer/bm**

El astrario de Giovanni Dondi

En el siglo XIV se construyó el primer mecanismo de relojería que representó los movimientos de los planetas tal como los explicaba la doctrina de Ptolomeo. El manuscrito de su inventor ha permitido su reconstrucción

Emmanuel Poulle

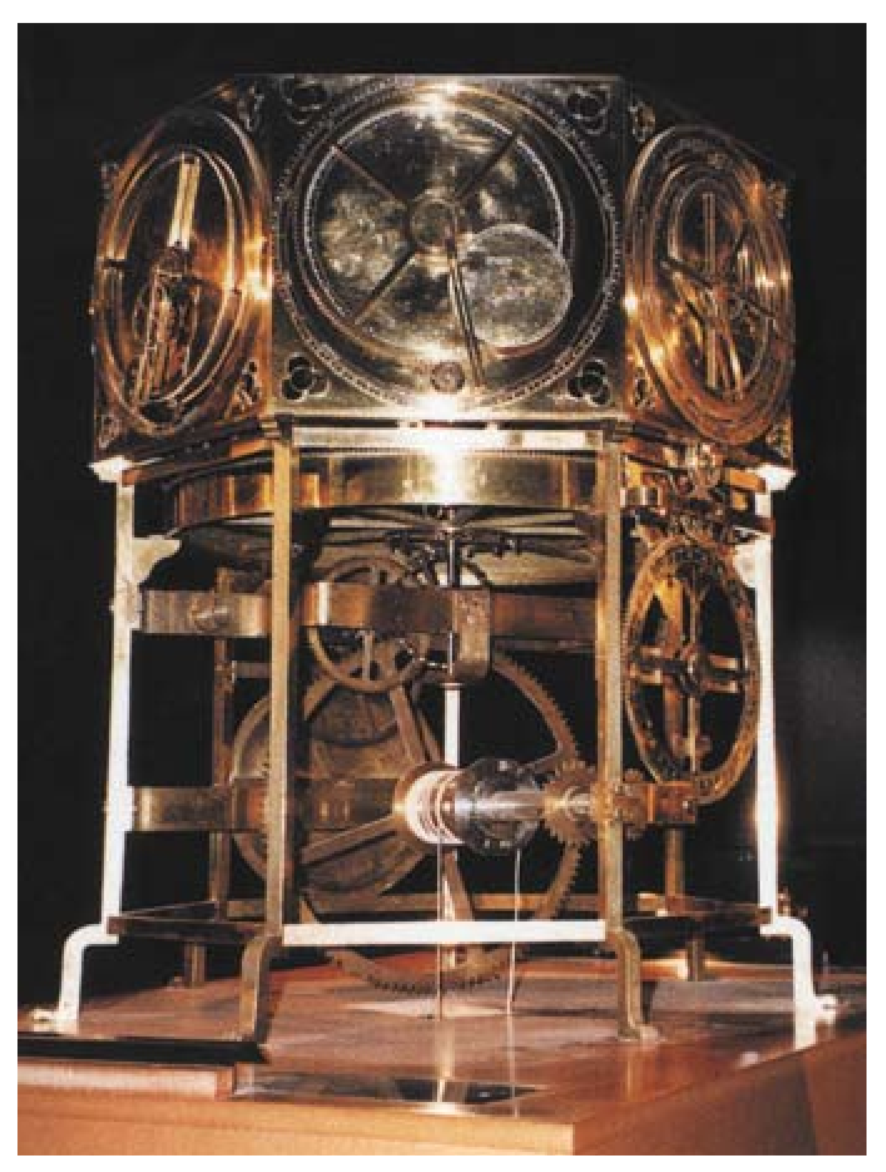
El interés de los sabios por la posición de los planetas en el cielo es común desde la antigüedad. Ya se les denominase astrólogos o astrónomos, siempre trataban de conseguir un enfoque científico. Antes de la adopción del sistema heliocéntrico en el siglo XVII y del descubrimiento de la forma elíptica de las órbitas de los planetas, la previsión de sus posiciones en el cielo pasó por tres etapas. El astrónomo griego Ptolomeo propuso en el siglo II que se descompusieran geométricamente los movimientos irregulares de los planetas en varios movimientos regulares, los cuales consiguió expresar en forma de tablas que permitían calcular la posición de cualquiera de ellos en cualquier fecha del calendario. El matemático italiano Campanus de Novara ideó en el siglo XIII un instrumento, llamado ecuatorio, que proporcionaba los mismos resultados, pero sin necesidad de cálculos: los discos que lo componen están dispuestos de tal forma que constituyen una representación concreta de las construcciones geométricas de Ptolomeo. Giovanni Dondi simplificó aún más el planteamiento un siglo más tarde y proyectó y construyó un ecuatorio accionado automáticamente por un mecanismo de relojería, al que llamó "astrario". Esta obra realmente única resulta todavía más impresionante por haber sido realizada en una época en la que no se tenían grandes conocimientos ni de relojería ni de ecuatorios.



Los relojes medievales constaban de un elemento motor (la caída de un peso), de un "volante" que frenaba la caída y de un engranaje que transformaba el movimiento del volante en una indicación del paso del tiempo. La relojería en la que intervienen estos tres elementos se remonta a finales del siglo XIII, más concretamente a los años 1280 (la palabra *horologium* es más antigua y se refiere únicamente a los dispositivos que indicaban las horas, por ejemplo, el cuadrante solar). A principios del siglo XIV se despertó un entusiasmo considerable por los relojes. El interés se centró primero en las máquinas destinadas a marcar la hora y luego en las que las representaban. Surgió entonces la idea de fabricar relojes astronómicos que representasen no sólo el movimiento diurno del Sol (indicación de la hora) sino también su movimiento anuo. Estos relojes astronómicos tuvieron un gran éxito desde su aparición misma y contribuyeron al desarrollo de la propia relojería durante el siglo XV. Jacopo Dondi, el padre de Giovanni Dondi, construyó un reloj astronómico para la ciudad de Padua ha-

El autor

EMMANUEL POULLE es historiador de la ciencia, director honorario de l'École des Chartes y secretario perpetuo de la Academia Internacional de Historia de la Ciencia.



1. LA RECONSTRUCCION DEL ASTRARIO del Observatorio de París (*arriba*) respeta escrupulosamente las instrucciones de Dondi. El astrario es una torre poligonal de siete lados en la que se alojan los mecanismos de los siete cuerpos celestes (Sol, Luna y los planetas conocidos entonces: Mercurio, Venus, Marte, Júpiter y Saturno). El motor de relojería (*dibujo de la página anterior*) se sitúa en el centro. El peso cuelga del cordel blanco, que se enrolla sobre el tambor. Hace girar la "rueda del año" (*horizontal, debajo de los cuadrantes planetarios*) a razón de un diente por día. Este movimiento acciona a su vez los mecanismos de los siete cuerpos celestes.

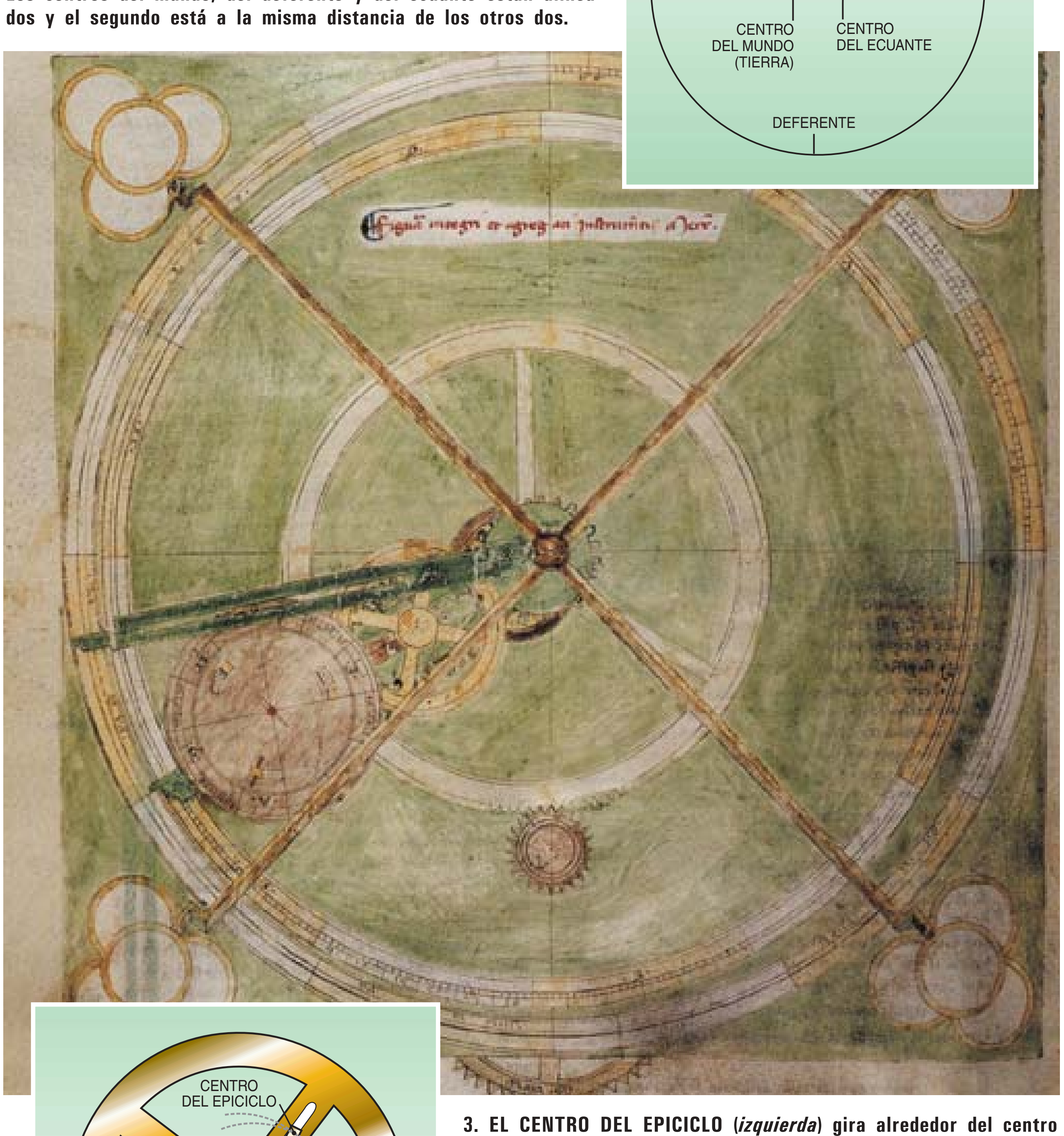
cia 1350, reloj que se instaló en el Palacio del Capitán (y allí sigue estando, aunque ha experimentado bastantes transformaciones durante su historia). El ecuatorio que había ideado Campanus hacia 1260 alcanzó cierta notoriedad en el siglo XIV, al ser incorporado a la enseñanza universitaria.

El astrario es el primer reloj planetario. Originalmente fue concebido como un ecuatorio mecanizado en el que un mecanismo de relojería accionase los movimientos de los planetas. Dondi inició los cálculos previos a la concepción del astrario hacia 1365 y tardó 16 años en fabricarlo. Lo finalizó hacia 1380, en una época en que los acontecimientos políticos le obligaron a abandonar Padua. Italia estaba organizada en ciudades estado cuyas rivalidades se traducían en frecuentes conflictos. Se trasladó a Pavía, en Lombardía, llevándose la obra maestra que hubiera tenido que enorgullecer a la ciudad de Padua. Allí recibió a visitantes ilustres y entusiastas para quienes el reloj era la octava maravilla del mundo y que no se sorprendían al comprobar que el reloj no funcionaba. La documentación conservada en Pavía sobre el astrario se limita a explicar las reparaciones sucesivas a que fue sometido, que no lograron hacerlo funcionar correctamente. Sus responsables debieron de cansarse de tantos cuidados inútiles ya que a comienzos del siglo XVI se pierde el rastro del astrario, que probablemente fue arrinconado, como todos los relojes que han dejado de funcionar.

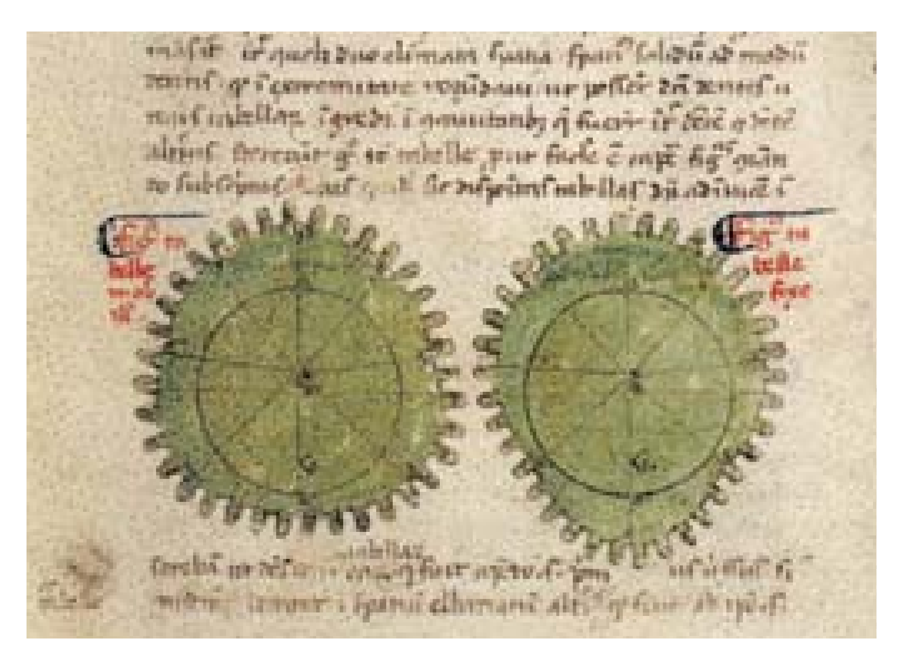
Durante la construcción del astrario Dondi redactó un cuaderno de notas en el que describió las distintas fases de su realización. Gracias a este documento, el único de ese tipo que nos ha llegado desde la Edad Media, se pueden conocer todos los detalles técnicos de la construcción del astrario y se ha podido reconstruir este aparato único.

El astrario es una torre poligonal de siete lados que tienen aproximadamente un metro de altura (*véase la figura 1*). En el centro de su parte inferior hay un mecanismo de relojería y una esfera de reloj en una de las caras. Es un reloj ordinario, en el sentido de que su cuadrante contiene las 24 graduaciones correspondientes a las horas y de que gira por delante de una referencia fija. En la parte superior hay siete cuadrantes, uno en cada una de las caras, en los que se encuentran los mecanismos de los siete astros principales (Sol, Luna, así como los planetas entonces conocidos: Mercurio, Venus, Marte, Júpiter y Saturno). Los distintos mecanismos son independientes entre sí. El astrario pretende ser una imagen del mundo. Desde Ptolomeo se admitía que el movimiento diurno de la bóveda celeste era el motor de todos los demás movimientos del cielo. El mecanismo de relojería del astrario es análogamente el responsa-

2. SEGUN LA TEORIA DE PTOLOMEO, que fue la autoridad astronómica indiscutible hasta el Renacimiento (*derecha*), la Tierra se encuentra en el centro del mundo y cada planeta recorre un pequeño círculo, llamado epiciclo, cuyo centro recorre un círculo mayor, el deferente, excéntrico respecto al centro del mundo. El planeta avanza a velocidad constante sobre su epiciclo. La velocidad del centro del epiciclo sobre el deferente no es en cambio constante ni respecto al centro del deferente ni respecto al centro del mundo, sino respecto a un tercer punto, llamado centro del ecuante. Los centros del mundo, del deferente y del ecuante están alineados y el segundo está a la misma distancia de los otros dos.



3. EL CENTRO DEL EPICICLO (*izquierda*) gira alrededor del centro del deferente, pero su velocidad es constante respecto al centro del ecuante: es un punto fijo sobre una regla que pasa por el centro del deferente, y que es arrastrado por una rueda que gira alrededor del centro del ecuante (cuyo movimiento es accionado por el mecanismo de relojería, siendo su velocidad constante). Se desplaza sobre una hendidura practicada sobre un radio de la rueda del ecuante que hace posible que se produzcan variaciones de longitud. En el cuadrante de Mercurio (*arriba*) puede apreciarse otro ejemplo de hendidura. En este caso la aguja, llamada del lugar verdadero, es arrastrada por el planeta e indica su posición en el zodiaco, sobre la graduación exterior del cuadrante.



4. DONDI IDEO DISPOSITIVOS específicos para tener en cuenta las características propias de cada planeta. En concreto, ideó dos ruedas dentadas de contornos irregulares y complementarios para transmitir su movimiento epicíclico a la Luna: una tiene un lado achatado (*izquierda*) mientras que la otra tiene un lado más abultado (*derecha*).

ble de todos los mecanismos planetarios.

¿Cómo funciona? El mecanismo de relojería hace girar una gran corona horizontal de 365 dientes, llamada rueda del año, y situada entre la parte superior y la inferior, debajo de los cuadrantes de los planetas (*véase la figura 1*). Su centro es el eje de la torre. Esta rueda es el motor común de todos los mecanismos planetarios asociados a los cuadrantes (excepto el de la Luna). Avanza a razón de un diente por día y acciona los distintos mecanismos planetarios.

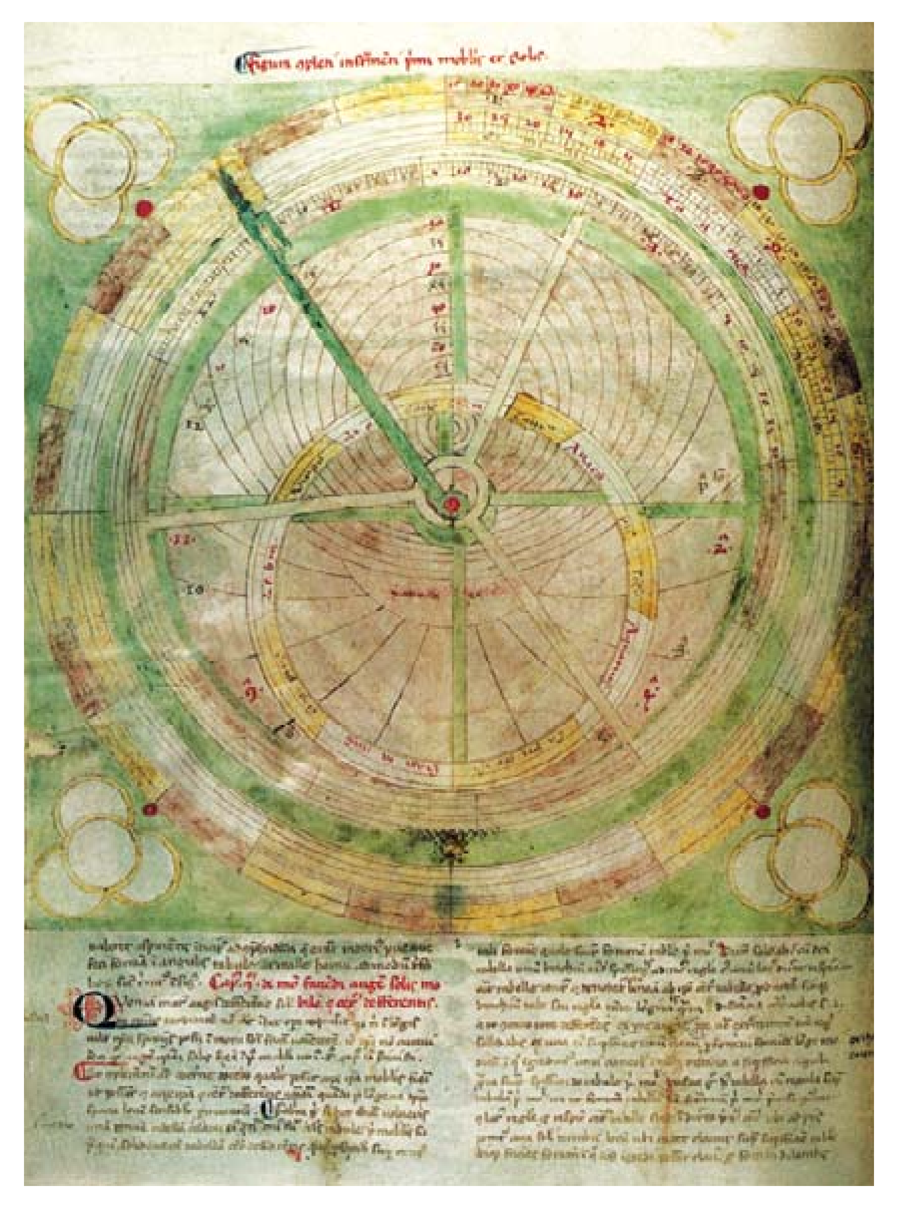
Los mecanismos planetarios de los cuadrantes reproducen los movimientos de los planetas de acuerdo con la construcción geométrica de Ptolomeo: el planeta recorre un pequeño círculo, llamado epiciclo, cuyo centro recorre un gran círculo, llamado deferente, excéntrico respecto al centro del mundo, es decir, la Tierra. La velocidad angular del centro del epiciclo sobre el deferente es constante respecto a un tercer punto, llamado centro del ecuante (*véase la figura 2*). Giovanni Dondi reprodujo a escala reducida lo que se suponía entonces que eran los movimientos de los planetas, para lo cual tuvo que resolver tres tipos de problemas que planteaba la mecanización: el respeto de la periodicidad, la existencia de dos excentricidades (la del centro del deferente y la del centro del ecuante) y el movimiento epicíclico.

Para poder respetar las periodicidades de los movimientos de los planetas tuvo que llevar a cabo cálculos muy complejos que permitiesen proyectar trenes de engranajes, situados detrás y sobre cada cuadrante, que hiciesen girar respectivamente la rueda del ecuante y la del planeta sobre el epiciclo a las velocidades deseadas. Como intentó utilizar el menor número de ruedas y de piñones posible, sus trenes de engranajes resultaron poco precisos. Fue muy consciente de ello, pues en su cuaderno añadió una larga lista de instrucciones acerca de la frecuencia con que convenía avanzar o retrasar manualmente los mecanismos planetarios.

Dondi resolvió en cambio con acierto la dificultad asociada a la excentricidad: todo consistió en respetar a rajatabla las reglas de la teoría ptolemaica. Como el movimiento del centro del epiciclo no es regular más que respecto al centro del ecuante, el eje del epiciclo viene accionado por una rueda que gira alrededor de dicho centro (accionada a su vez por el mecanismo de relojería). El problema consiste entonces en mantener el eje del epiciclo a una distancia constante del centro del deferente, para lo que Dondi situó el eje del epiciclo sobre una regla que gira alrededor del centro del deferente. Dicho eje puede además desplazarse sobre una hendidura practicada en uno de los radios de la rueda del ecuante, la rueda motriz de su movimiento (*véase la figura 3*). El resultado es que el centro del epiciclo se mantiene a una distancia constante del centro del deferente, gracias a la regla del deferente, y gira a velocidad constante alrededor del centro del ecuante, gracias a la rueda del ecuante.

Los trenes de engranajes responsables del movimiento epicíclico se organizan alrededor del centro del ecuante (ya que las velocidades angulares relativas al movimiento del planeta sólo son constantes respecto a dicho centro). La primera rueda es fija y está centrada en el deferente, mientras que las demás ruedas se sitúan en uno de los radios de la rueda del ecuante. Para que estas ruedas sigan engranándose con la rueda fija, independientemente de la distancia del centro del epiciclo al centro de la rueda del ecuante, todo el soporte del tren, y no sólo el eje del epiciclo, debe poder deslizarse por la hendidura anterior. Este soporte consiste en una regleta sobre la que se fijan los ejes de las ruedas intermedias y el eje del epiciclo. Dondi ideó dispositivos específicos para tener en cuenta las características de la teoría ptolemaica en los casos de Mercurio y de la Luna. Por ejemplo, el tren epicíclico de Mercurio cuenta con dos ruedas ovaladas y el de la Luna con dos ruedas de contornos irregulares y complementarios (*véase la figura 4*).

¿Cómo consiguen indicar dichos mecanismos planetarios la posición de los planetas en el firmamento? Con una aguja que gira alrededor del centro del mundo y que contiene una hendidura por la que dis-



5. EL CUADRANTE DEL SOL es un astrolabio mecanizado que permite representar tanto su movimiento diurno como su movimiento anuo sobre el zodiaco.

curre el cuerpo del planeta. La aguja es arrastrada por el movimiento del planeta e indica la posición de éste sobre la graduación fija del contorno del cuadrante, que representa el zodiaco (*véase la figura 3*).

El cuadrante del Sol difiere de los cuadrantes de los demás planetas, pues viene accionado directamente por el reloj ordinario (situado en la parte inferior de la torre). El movimiento del Sol es muy sencillo (no tiene ni epiciclo ni deferente). Constituye un astrolabio mecanizado, siendo el astrolabio un instrumento que representa tanto el movimiento diurno del Sol como su movimiento anuo sobre el zodiaco (*véase la figura 5).*

El astrario fue el primer reloj planetario de la historia. En él se inspiraron los fabricantes de nuevos modelos durante los doscientos años siguientes, hasta el punto de que en todos ellos se pueden encontrar algunos de sus dispositivos, como las ruedas alrededor del centro del ecuante y las hendiduras utilizadas para hacer variar la distancia entre dos puntos relacionados mecánicamente. Las ruedas ovaladas y las de bordes irregulares no parecen en cambio haber creado escuela, tal vez porque se las considerase las responsables de las mediocres prestaciones del aparato.

La existencia de un cuaderno de notas en el que se describe la construcción del astrario, y que se conserva en la biblioteca capitular de Padua, ha originado tres intentos de reconstrucción. En los dos primeros no se respetaron con fidelidad las instrucciones de Dondi. Gracias a una buena comprensión del texto, para lo cual se requieren competencias en paleografía, latín y astronomía medieval, mis colegas y yo hemos realizado una reconstrucción fiel del astrario, la cual se conserva en el Observatorio de París.

Es de latón, como el original. Los dientes de los engranajes medievales adquirían su forma adecuada por medios empíricos. Nosotros hemos preferido la ayuda del ordenador para trazar la forma de los dientes, que Dondi no precisó. Se comprobó su buen funcionamiento en maquetas de madera y sobre todo quedó demostrado que las ruedas cuyos contornos no son circulares no constituyen un obstáculo para la buena marcha del astrario, siempre y cuando se adapte la forma de los dientes. Para suprimir el rozamiento de la rueda del año, se la instaló sobre un rodamiento de bolas. El astrario era genial desde el punto de vista científico, pero la reconstrucción ha demostrado que es casi seguro que nunca funcionase adecuadamente. La admiración que suscitaba entre quienes iban a visitarlo en el siglo XV no se debía tanto a lo que veían como a lo que esperaban o creían ver.

Bibliografía complementaria

EL ASTROLABIO. John North. Temas de Investigación y Ciencia, n.º 4; junio de 1996.

POUR UNE TYPOLOGIE DE L'HORLOGERIE ASTRONOMIQUE MÉDIÉVALE. Emmanuel Poulle. Académie des inscriptions et belles lettres, Comptes-rendus, págs. 635-662, 1997.



Películas bacterianas

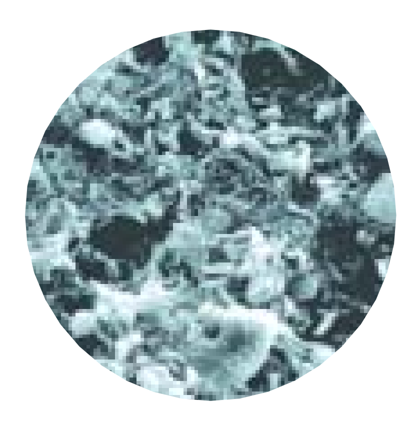
Las colonias bacterianas son causa de las infecciones más tenaces que se conocen. Para vencerlas hay que aniquilar sus sistemas de comunicación

J. W. Costerton y Philip S. Stewart

Mermar la capacidad de comunicación del enemigo puede resultar mucho más efectivo que destruir sus refugios o sus fábricas en la guerra contemporánea, como bien saben los estrategas. Muchos investigadores piensan que hay que actuar de la misma manera en la lucha contra las bacterias más peligrosas.

Los microbios responsables de muchas de las infecciones más persistentes se organizan en complejos y tenaces entramados o películas biológicas —biopelículas—, casi imposibles de erradicar con los antibióticos corrientes. La investigación médica reciente ha descubierto que cuando los microorganismos se disponen de esta forma dependen de manera decisiva de su capacidad para enviarse señales unos a otros. Los productos químicos capaces de interferir con esos mecanismos de comunicación podrían impedir las infecciones originadas por ellos o debilitarían sus bastiones, con lo que permitirían combatir un gran rango de enfermedades, que abarca desde las neumonías que se presentan repetidamente en pacientes con fibrosis quística, hasta aquellas infecciones de progresión lenta que proliferan frecuentemente alrededor de las prótesis médicas.

Actualmente ya se están evaluando fármacos inhibidores de la comunicación bacteriana en modelos animales, pero hay que preguntarse por qué ha tardado tanto en entrar en el arsenal médico arma tan elegante. La respuesta se reduce a decir que los microbiólogos han tardado mucho tiempo en conocer plenamente al enemigo con el que tienen que enfrentarse. Desde finales del siglo XIX, cuando los estudios de Robert Koch en Alemania demostraron la causa microbiológica de las enfermedades, la mayoría de la gente, científicos incluidos, ha considerado a las bacterias como meras células aisladas que flotan o nadan en alguna clase de medio líquido, en ocasiones



1. LAS LENTILLAS (*a la izquierda*) se encuentran entre las superficies cotidianas que pueden ser colonizadas por las películas bacterianas, que son comunidades de microorganismos inmersos en una baba espesa. La mostrada encima corresponde a un caso de lentillas y originó presumiblemente la infección de córnea diagnosticada al propietario.

formando parte del cuerpo humano. Esta imagen deriva de la forma en que suele examinarse a estos organismos, dirigiendo los microscopios sobre células que han sido cultivadas y suspendidas en algún tipo de fluido. Dicho procedimiento es conveniente, pero no el más adecuado, ya que las condiciones experimentales no son un reflejo real del medio ambiente microbiano. Las bacterias cultivadas en el laboratorio de forma tradicional actúan en consecuencia de manera distinta a las que se encuentran en la naturaleza.

Hace muy pocos años que los bacteriólogos hemos profundizado en el modo de vida de los microbios causantes de enfermedades. Nuestro trabajo muestra que de hecho muchos de esos organismos no emplean demasiado tiempo flotando como células aisladas, sino que más bien se adhieren a una gran variedad de superficies húmedas en colonias organizadas que, a su vez y sorprendentemente, forman diversas comunidades.

En retrospectiva no deja de maravillar que se haya pasado por alto este modo de vida bacteriano durante tanto tiempo. Sobre todo cuando las películas bacterianas se encuentran por doquier, pues la placa dental a la que nos enfrentamos cada día, la capa resbaladiza que cubre las rocas de un arroyo o la baba y el limo que inevitablemente se materializan en el fondo de un jarrón de flores al segundo o tercer día no son sino meros ejemplos. Las bacterias, nuestro sujeto de estudio, no están empero solas a la hora de crear películas biológicas. Muy al contrario, la diversidad genética de microorganismos capaces de organizarse en barnices vivientes y la gran cantidad de ambientes que pueden colonizar nos convence de que se trata de una antigua estrategia de crecimiento microbiano. Pero la apreciación y la comprensión de esta estrategia son un fenómeno reciente para la comunidad científica.

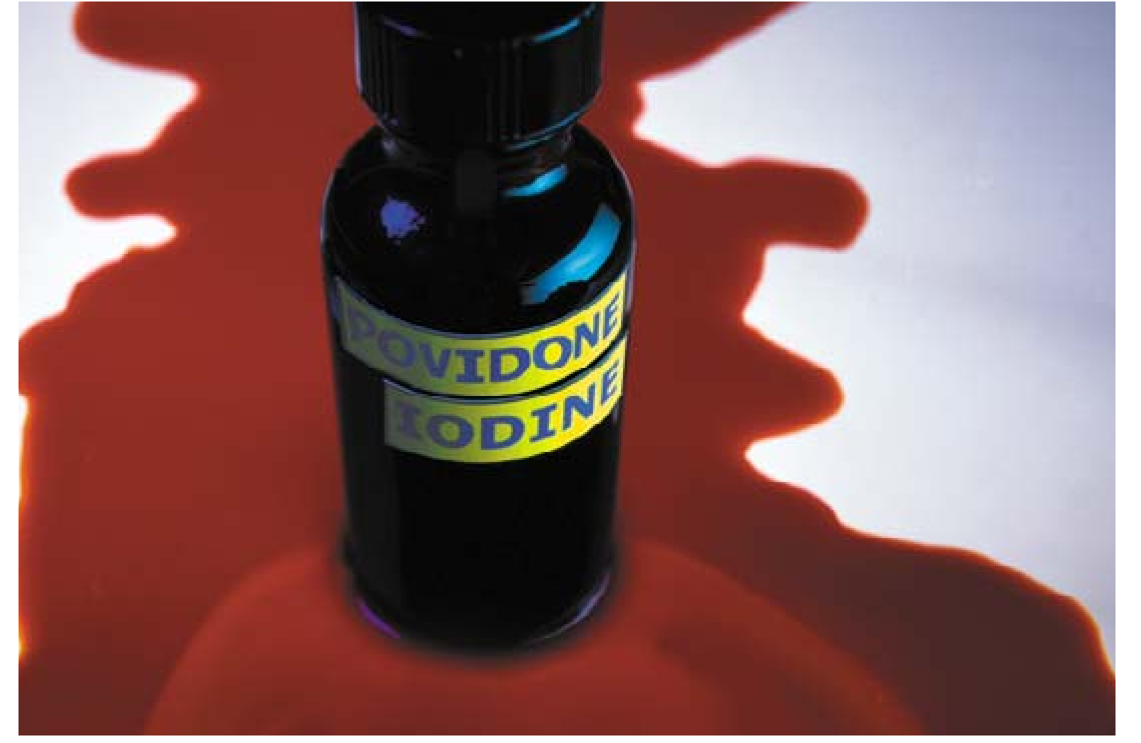
2. PELIGRO EN LOS TUBOS. **Las películas que se forman en los catéteres urinarios son fuente habitual de infecciones. El riesgo es pequeño cuando los tubos se colocan por cortos períodos de tiempo, pero el peligro aumenta si se usan prolongadamente. Un estudio fechado en 1996 demostró que las infecciones afectaban a entre el 10 y el 50 por ciento de los pacientes después de una semana. Después de un mes prácticamente todos ellos estaban infectados.**

Gérmenes en Planilandia

Algunos biólogos han intentado desde hace bastante tiempo examinar las bacterias que viven en las películas usando los microscopios habituales; los hay que llegaron a emplear el microscopio electrónico. Siempre vieron algunas bacterias, pero fueron incapaces de obtener imágenes claras del interior de las películas vivientes, por lo que la conclusión repetida fue que las células del interior estaban en su mayoría muertas o se distribuían en grupos sin orden alguno. Esta teoría permaneció sin apenas cambios hasta hace un decenio, momento en que los bacteriólogos comenzaron a utilizar la técnica denominada microscopía confocal por exploración con láser, que permite seccionar y ver planos de la micropelícula a distintas profundidades, planos que después pueden ser apilados para crear una representación tridimensional.

Esta fue la metodología aplicada por John R. Lawrence, Douglas E. Caldwell y Costerton en 1991 en un esfuerzo conjunto para estudiar la estructura de las biopelículas. Demostramos que las bacterias crecían en pequeños enclaves, a los que llamamos microcolonias. Las propias bacterias no suelen constituir ni la tercera parte de la materia presente. El resto es una sustancia blanda y pegajosa secretada por ellas y que invariablemente absorbe agua y atrapa partículas pequeñas.

Esta sustancia o baba espesa, a la que formalmente se llama la matriz extracelular, mantiene unidas las microcolonias. Una película biológica está constituida por infinidad de este tipo de grupúsculos, separados por una red de canales de agua. El líquido que fluye por esos diminutos conductos baña cada congregación microbiana, aportando nutrientes disueltos y eliminando productos de desecho. Las células situadas en la periferia de una microcolonia están bien servidas por el sistema de tuberías, mientras que las del interior permanecen sometidas a un bajo y restringido suministro. La densa agregación de células que las rodea y la matriz orgánica que las mantiene unidas actúan de barrera para el flujo de agua. Las células del centro de la colonia tienen que sobrevivir



3. CABALLOS DE TROYA. A pesar de las extremadas precauciones que se toman, hay veces que las películas bacterianas se introducen en los medicamentos. En 1993 y en 1994, cien personas asmáticas murieron debido a que el albuterol que inhalaban contenía *Pseudomonas aeruginosa*, una bacteria de las que forman biopelículas. La identificación del foco condujo hasta un contenedor usado durante el proceso de elaboración. Otra famosa bacteria formadora de biopelículas, *P. cepacia*, colonizó varias botellas de un potente antiséptico (povidone-iodine), causando infecciones entre los pacientes de un hospital infantil de Texas en 1989.

por tanto con los nutrientes que buenamente se difundan hacia ellas. A pesar de lo cual el suministro no es completamente nulo. Como el pegamento es agua en su mayoría, las moléculas pequeñas pueden moverse libremente, aunque existan ciertas excepciones importantes. A una sustancia le resultará muy difícil difundirse hacia el interior de la microcolonia si reacciona con las células o con el material de la matriz extracelular que encuentra a su paso.

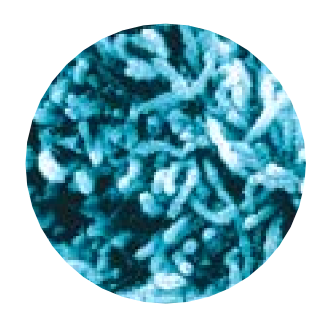
La posibilidad de reacción química da lugar a cambios ambientales de pequeña escala dentro de la biopelícula. Dichas variaciones fueron observadas incluso antes de que la microscopía confocal revelase la causa. Nuestro colega Zbigniew Lewandowski comenzó a tomar medidas directas de las condiciones químicas de las biopelículas en 1985, utilizando microelectrodos en forma de aguja con las puntas separadas por tan sólo una centésima de milímetro. Así encontró, entre otras cosas, que la concentración de oxígeno puede variar radicalmente entre posiciones tan próximas como las separadas por cinco centésimas de milímetro, poco más de la anchura de un cabello humano. Se mide la concentración de oxígeno de una comunidad bacteriana porque es un indicador del estado fisiológico de las células. Por ejemplo, una película viva compuesta exclusivamente por *Pseudomonas aeruginosa* (la bacteria responsable de la neumonía en la fibrosis quística) muestra actividad celular y proliferación únicamente allí donde pueda penetrar el oxígeno, esto es, en las dos o tres centésimas de milímetro más externas de cada microcolonia. Las células restantes permanecen vivas pero durmientes. Esta mezcla de estados metabólicos difiere de la típica uniformidad de los cultivos de laboratorio.

La diversidad de ambientes químicos que surgen dentro de una misma biopelícula implica que el aspecto que presente una célula y su modo de actuar puedan ser muy diferentes de los de una vecina, aunque ambas sean genéticamente idénticas. También son las condiciones locales las que regulan la producción de toxinas y de otros agentes desencadenantes de enfermedades elaborados por las células microbianas que crecen en estas capas. La consecuencia es que algunas células puede que inflijan poco daño al huésped mientras que otras resulten letales. La diversidad de ambientes químicos también puede permitir que varias especies bacterianas vivan una al lado de otra sin problemas. Hay ocasiones en las que una de ellas se alimenta de los desechos metabólicos de la otra, de modo que ambas se ayudan.

Hay un caso interesante cuyas líneas generales se comprenden desde 1940, el de las biopelículas que se forman en los alimentos ingeridos por el ganado vacuno y por otros rumiantes. Las películas están hechas inicialmente de organismos que digieren la celulosa de la materia vegetal y producen ácidos grasos. Cuando estas bacterias han producido suficientes ácidos grasos como para

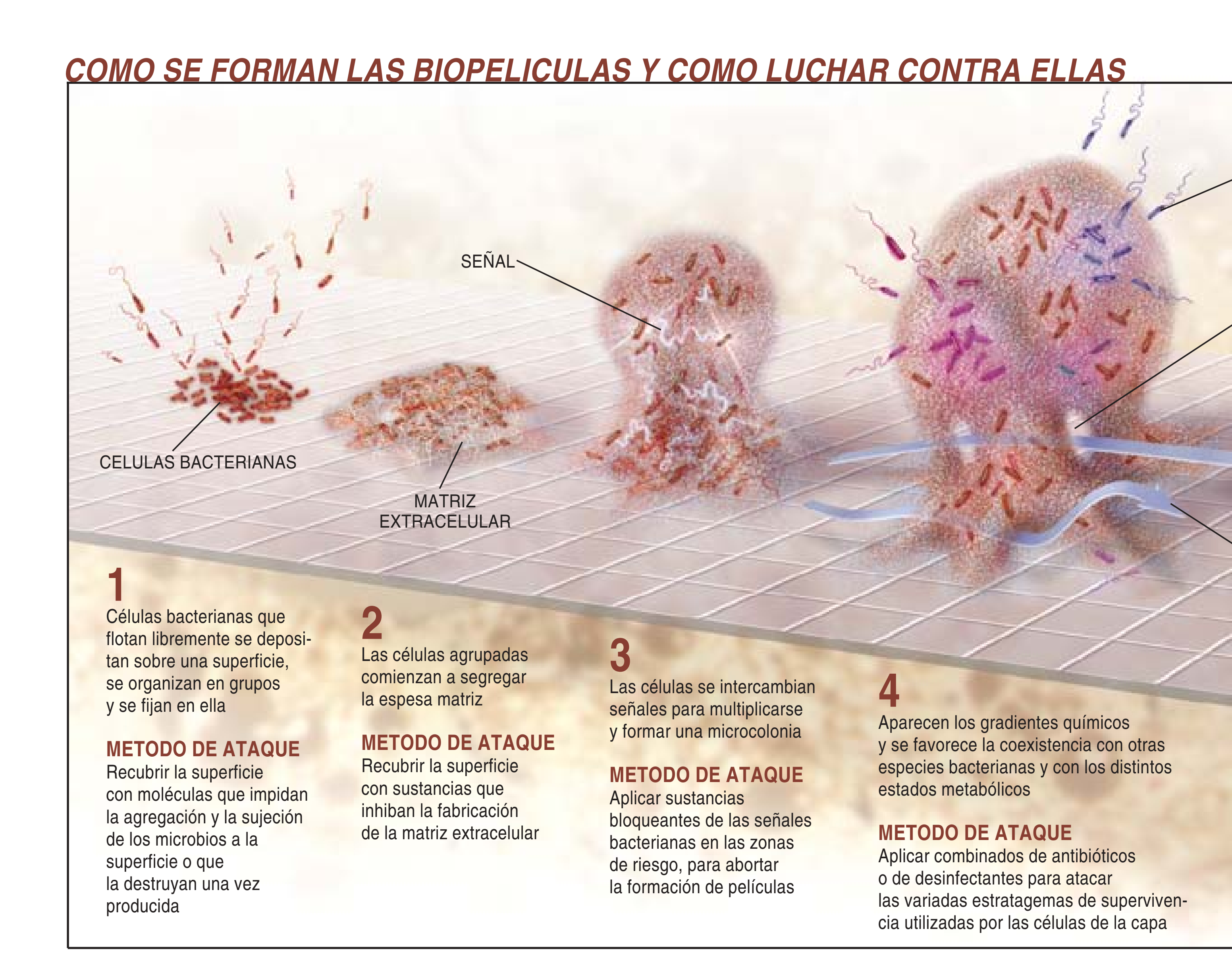
Los autores

J. W. ("BILL") COSTERTON y PHILIP S. STEWART han trabajado juntos desde hace casi 10 años. Costerton es doctor en bacteriología y director del Centro de Ingeniería de Biopelículas en la Universidad del Estado de Montana. Stewart es doctor en ingeniería química, subdirector y coordinador de investigación de la misma institución.



4. LA PLACA DENTAL es una biopelícula. Es sorprendente que un número creciente de pruebas relacione la placa dental con las dolencias cardíacas.

COMO SE FORMAN LAS BIOPELICULAS Y COMO LUCHAR CONTRA ELLAS



inhibir su propio crecimiento, células móviles de *Treponema* y de otras especies invaden la película y comienzan a usar esas sustancias como combustible para su propio metabolismo. Así es como el forraje vegetal desaparece y es transformado en una masa bacteriana que el animal digiere más tarde. De modo que se puede decir que las vacas viven de películas bacterianas y no de heno.

Estas películas son claramente imprescindibles para los rumiantes. Pero para el resto de nosotros no tienen mayor significación o se convierten en una seria amenaza para la salud. De hecho pueden sobrevivir a la mayoría de los tratamientos químicos disponibles para el control bacteriano utilizados en medicina y en los procesos industriales, tratamientos que por lo demás erradicarían rápidamente a las bacterias flotantes. Además pueden evadir a las moléculas producidas por las células del sistema inmune. Tal es la razón de que las infecciones provocadas por películas bacterianas tiendan a ser muy persistentes.

Los microbios más duros

¿A qué se debe exactamente que las biopelículas sean tan resistentes? Algunas veces se debe a que los antibióticos y los antisépticos no pueden atravesar la película. Los derivados de la penicilina, por ejemplo, encuentran gran dificultad para penetrar las películas que contienen células productoras de betalactamasas. Estas enzimas degradan el antibiótico más rápidamente de lo que puede difundirse hacia el interior, así que nunca alcanzan sus capas más profundas. Incluso a la lejía clórica, el desinfectante favorito de los entornos industriales y domésticos, le resulta complicado destruir las biopelículas. Como es un reactivo oxidante potente, al final encontrará el modo de penetrar hacia dentro, pero primero tiene que eliminar capa tras capa la capacidad neutralizante de la biopelícula. Dicho proceso conlleva más tiempo y lejía de lo que uno imagina. Por tanto es fácil relajarse y pensar

NUEVAS ESPECIES
DE BACTERIAS SE UNEN
A LA BIOPELICULA

CANALES
DE AGUA

FLUJO
DE AGUA

BACTERIAS
QUE TRAS
DESPEGARSE
ESCAPAN

5

Algunas células se despegan, vuelven a su estado libre y escapan, quizá para formar nuevos agregados

METODO DE ATAQUE

Inducir a las células a despegarse para después anegarlas con antibióticos o con anticuerpos (las moléculas del sistema inmune)

que todas las bacterias están ya muertas cuando en realidad muchas de ellas permanecen todavía vivas.

Hay otros factores que contribuyen a aumentar la tenacidad. Incluso cuando los antisépticos penetren fácilmente a través de la película, los microorganismos suelen sobrevivir a tratamientos que erradicarían completamente a las células flotantes. Esta propiedad ha desconcertado siempre a los biólogos, aunque actualmente se sabe que la diversidad de condiciones y de tipos bacterianos que hay en una biopelícula confiere protección contra los agentes antibacterianos.

Consideremos de nuevo la acción de la penicilina, la cual ataca células en replicación de numerosas especies bacterianas. Si una biopelícula contuviese zonas que estuvieran privadas de un nutriente esencial, las células de esas zonas, que estarían vivas pero no replicándose, sobrevivirían al tratamiento con penicilina. Puesto que microorganismos activos e inactivos se encuentran estrechamente yuxtapuestos en una biopelícula y debido a que las bacterias supervivientes pueden alimentarse de las muertas, las pocas células que queden vivas tras finalizar un tratamiento con antibióticos pueden reconstituir el estado original de la biopelícula en cuestión de horas.

Estas propiedades explican que productos antimicrobianos que funcionan perfectamente en cultivos celulares no produzcan con frecuencia los resultados positivos esperados por las personas que luchan contra estas invasiones. La mayoría de ellas son médicos y pacientes, pero hay un número considerable de ingenieros, que tienen que batallar con los efectos ruinosos de las biopelículas en la industria, donde las bacterias a menudo provocan fallos de la maquinaria y aceleran la corrosión de las tuberías. Para ayudarles a todos es para lo que la Fundación Nacional de la Ciencia creó en 1990 el Centro de Investigación de Ingeniería (ahora llamado Centro de Ingeniería de Biopelículas) en la Univer-



5. DESPUES DE 60 MINUTOS de tratamiento con lejía la mayoría de las células de una película bacteriana mueren (*en verde*), pero hay muchas otras que permanecen activas (*en rojo*), sobre todo en el interior.



6. UNA EXUBERANTE BIOPELICULA surgida en un intercambiador de calor industrial. Este tipo de contaminación puede reducir el rendimiento.

sidad de Montana, donde nosotros dos hemos trabajado juntos desde hace casi diez años.

La investigación desarrollada en este centro ha revelado, entre otras cosas, que a la vez que las bacterias se adhieren a una superficie y forman una película, producen cientos de proteínas que están ausentes de los cultivos flotantes. Algunas de estas proteínas tienen que ver con curiosos reordenamientos que las células llevan a cabo justo después de depositarse en la superficie y antes de fijar sus posiciones, tal y como Roberto Kolter y otros colegas de la Escuela de Medicina de Harvard han demostrado mediante delección de ciertos genes (donde están cifradas las proteínas) en varios tipos de bacterias. Otros investigadores que trabajan con *Staphylococcus epidermidis*, causa de abundantes infecciones, han identificado genes que gobiernan el siguiente paso en el desarrollo de la biopelícula: la síntesis de la matriz extracelular. Si se inactivan dichos genes, las bacterias pierden su capacidad para formar una película en el tubo de ensayo y aparentemente también en los tejidos de un animal de laboratorio.

Trabajos más recientes han revelado el mismo tipo de control genético en otras especies. *P. aeruginosa* posee varios genes que básicamente se activan en el intervalo de 15 minutos desde el momento en que la bacteria se fija a la superficie. Uno de ellos, *algC*, se necesita para sintetizar alginato, el polímero gelatinoso que forma la mayor parte de la matriz extracelular.

¿Cómo es posible que todas las células que van a formar el conjunto de una biopelícula sepan que tienen que poner en marcha determinados genes? La repuesta se encuentra en el hecho de que estos aparentemente simples y autónomos microbios se comunican entre sí. Las moléculas más relevantes encargadas de la comunicación en el caso de *P. aeruginosa* y de un amplio grupo de bacterias similares son las acil-homoserin-lactonas, que todas las células producen normalmente en escasa cantidad. Cuando se agrega un número suficiente de ellas, la concentración de esas sustancias aumenta, con la consecuencia de que se dispara la actividad de decenas de genes. David G. Davies ha demostrado que este mecanismo llamado “quorum sensing” es fundamental para la formación de las biopelículas. Estirpes de *P. aeruginosa* modificadas en el laboratorio, a las que se les ha eliminado el gen de una lactona concreta, son de hecho incapaces de construir biopelículas normales, formando en su lugar cúmulos desorganizados.

7. CAUSA DE CORROSION. Ciertas biopelículas originan serios problemas en las fábricas cuando colonizan el interior de las tuberías de metal y aceleran su corrosión. Se trata de un proceso que ocasiona la mitad de los cortes de suministro que ocurren en centrales de producción eléctrica basadas en conducciones de vapor. Las compañías gastan miles de millones de dólares cada año para combatir estos problemas.

Recientemente se han identificado las moléculas que sirven de mensajero en películas que crecen, entre otros lugares, en los catéteres urinarios. Son ellas y las que proliferan en las prótesis permanentes las que originan las infecciones más preocupantes por esta causa, que afectan a decenas de millones de personas anualmente. Suelen ser de evolución lenta y a menudo pasan inadvertidas, pero se manifiestan periódicamente y son difíciles de eliminar. Las películas bacterianas son también responsables de enfermedades bucales, infecciones de próstata, cálculos de riñón, tuberculosis, legionela y ciertas infecciones del oído medio.

Una vez sabido cómo se forman las películas bacterianas debería ser posible ponerlas a raya con medicamentos que atacaran alguna de sus muy especiales propiedades. Una posibilidad sería el embotamiento con algún tipo de molécula de los apéndices externos utilizados por las células para adherirse a las superficies y comenzar a formar una película. Otra sería la interferencia en la síntesis de matriz extracelular, por ejemplo cubriendo las prótesis médicas con sustancias químicas que inactiven los genes responsables de su fabricación. También se podría pensar en atacar a las moléculas que la biopelícula utiliza para comunicarse, entorpeciendo así su formación o suprimiendo la producción de toxinas y otras actividades concretas. En lugar de tratar de inundar a los microorganismos con venenos (que de paso matan a muchas otras bacterias inofensivas y beneficiosas), pronto se podrán manipular las células de forma mucho más sutil, bloqueando así la actividad patógena.

Guerra táctica

De hecho ya ha comenzado el desarrollo comercial de al menos un medicamento. Staffan Kjelleberg y Peter Steinberg observaron en 1995 que los tallos del alga roja (*Delisea pulchra*) que crece en la Bahía Bo-

tánica de Australia, muy raramente estaban cubiertos de películas bacterianas. Los ejemplares de esta alga permanecen inmaculados a pesar de que en estas aguas viven miles de especies de bacterias. ¿Cómo lo consiguen? Kjelleberg y Steinberg demostraron que *D. pulchra* echa mano de las sustancias químicas conocidas como furanonas sustituidas para permanecer libre de biopelículas. Se ha creado una nueva compañía, Biosignal, para producir mantos protectores elaborados con furanonas que puedan aplicarse sobre los cascos de los barcos y el utillaje para el cultivo marino.

Kjelleberg y Steinberg han descubierto hace pocos años por qué funcionó su invento. Las furanonas que aislaron son muy similares químicamente a las lactonas de acil-homoserina, las moléculas que gran número de biopelículas usan para la percepción del *quorum* y a otra clase de moléculas recién descritas por Bonnie L. Bassler y que son producidas prácticamente por todo tipo de bacterias para pasarse señales entre especies diferentes. Las furanonas se unen a los receptores bacterianos que en condiciones normales son utilizados por las moléculas de lactona, pero, a diferencia de ellas, las furanonas no provocan la misma respuesta en las bacterias, sino que bloquean su capacidad de activar los genes requeridos para la construcción de una biopelícula.

Las furanonas obstaculizan también todos los casos conocidos de comunicación bacteriana que utilizan las lactonas de homoserina como señal. Existen indicios de que estas sustancias pueden prevenir la formación de la película, al tiempo que contribuyen a la destrucción de la ya existente. Son ideales para el uso médico porque no son tóxicas y son relativamente estables dentro del cuerpo. Además han estado presentes en los océanos desde hace millones de años sin que se hayan desarrollado por ello bacterias resistentes a sus efectos, por lo que cabe esperar que no se engendren estirpes resistentes entre las que colonizan los instrumentos médicos y los tejidos humanos.

Otro resultado de esta línea de investigación quizá parezca pequeño desde el punto de vista práctico, pero pudiera tener grandes repercusiones a la larga, ya que revoluciona la comprensión de las bacterias. Los biólogos han comenzado a considerar la formación de biopelículas desde la perspectiva del desarrollo, tomando prestadas formas de expresión empleadas para describir el crecimiento embrionario. Igual que un oocito fertilizado da lugar a toda una variedad de tipos celulares durante el desarrollo del feto, las bacterias también se diferencian tras depositarse en una superficie. Sintetizan moléculas de comunicación que recuerdan a las feromonas y a las hormonas de insectos y animales, que sirven para coordinar la construcción de microcolonias dotadas de una complicada estructura. Esta disposición permite que los nutrientes fluyan de fuera adentro y los materiales de desecho de dentro a fuera, invitando a una comparación con los sistemas circulatorios de los animales superiores. Hay algunas películas en las que las bacterias de varias especies cooperan para digerir nutrientes que un solo tipo de ellas no puede explotar por completo. Estas observaciones indican que las hasta ahora consideradas ínfimas bacterias pudieran ocupar un lugar mucho más prominente en el esquema de la vida de lo que jamás se haya imaginado.



8. CONTAMINANTES DEL AGUA. Las biopelículas pueden comprometer la seguridad del agua potable, al crecer con frecuencia en el interior de las tuberías de distribución. Protegidos por la materia espesa que los envuelve, peligrosos microorganismos patógenos pueden proliferar a pesar del cloro. En la Universidad de Stanford se ha demostrado que cuando la bacteria responsable de los brotes de cólera, *Vibrio cholerae*, forma biopelículas puede sobrevivir a concentraciones de cloro de 10 a 20 veces superiores a las que normalmente tiene el agua que bebemos. Las biopelículas causaron que el abastecimiento de agua de Washington, D.C., violara repetidamente los límites federales de contaminación bacteriana considerados aceptables en 1996.

Bibliografía complementaria

BACTERIAL BIOFILMS: A COMMON CAUSE OF PERSISTENT INFECTIONS. J. W. Costerton, Philip S. Stweart y E. P. Greenberg en *Science*, vol. 284, págs. 1318-1322; 21 de mayo, 1999.

COMMUNITY STRUCTURE AND CO-OPERATION IN BIOFILMS. Dirigido por D. G. Allison, P. Gilbert, H. M. Lappin-Scott y M. Wilson. Cambridge University Press, 2001.

Imágenes e información sobre películas bacterianas pueden encontrarse en el Centro de Ingeniería de Biopelículas (Center for Biofilm Engineering) en la Universidad del Estado de Montana (www.erc.montana.edu), en la Sociedad Americana de Microbiología (http://dev.asmusa.org/ edusrc/biofilms/) y en la MicrobeLibrary (www.microbelibrary.org) haciendo una búsqueda con la palabra "biofilm".

Cómo distingue el cuerpo la izquierda de la derecha

La orientación de nuestros órganos internos se controla en parte por proteínas sintetizadas en un solo lado del embrión

Concepción Rodríguez Esteban, Angel Raya, Javier Capdevila y Juan Carlos Izpisúa Belmonte

Hagamos una prueba sencilla. Situémonos delante de un espejo y tracemos una línea vertical desde la parte superior de la cabeza hasta el abdomen. Observaremos que cada estructura anatómica externa de un lado tiene su contrapartida simétrica en el otro.

En el interior del cuerpo, sin embargo, sólo tenemos un corazón, un hígado, un estómago, un páncreas y un bazo. Sabemos además que el colon gira de derecha a izquierda. E incluso los órganos internos que son pares muestran alguna clase de asimetría; por ejemplo, el pulmón izquierdo tiene más lóbulos que el derecho y algunas estructuras del cerebro se alojan sólo en un hemisferio.

¿Por qué los órganos internos son asimétricos si nuestro exterior es completamente simétrico? ¿Cuál es el camino recorrido en uno y otro caso? En el curso de la búsqueda de respuestas a tales cuestiones se han identificado recientemente varias moléculas responsables de la ubicación de los órganos internos y de la forma en que se sitúan.

Los autores

CONCEPCION RODRIGUEZ ESTEBAN, ANGEL RAYA, JAVIER CAPDEVILA y JUAN CARLOS IZPISUA BELMONTE trabajan en el campo de la biología del desarrollo relacionada con la asimetría corporal, bajo la dirección del último en el Instituto Salk de La Jolla, California. Rodríguez se doctoró en Bellas Artes por la Universidad Politécnica de Valencia. Raya, doctor en medicina, se formó en la Universidad de Valencia. Capdevila se inició en el desarrollo de la mosca de la fruta, *Drosophila melanogaster*, en el Centro de Biología Molecular "Severo Ochoa" de la Universidad Autónoma de Madrid, donde se doctoró. Izpisúa es profesor de investigación en el Instituto Salk; sus estudios de los mecanismos moleculares que controlan el desarrollo embrionario le han valido, entre otros, el premio Bill Clinton al mejor investigador en su campo y el premio a la creatividad de la norteamericana Fundación Nacional para la Ciencia.

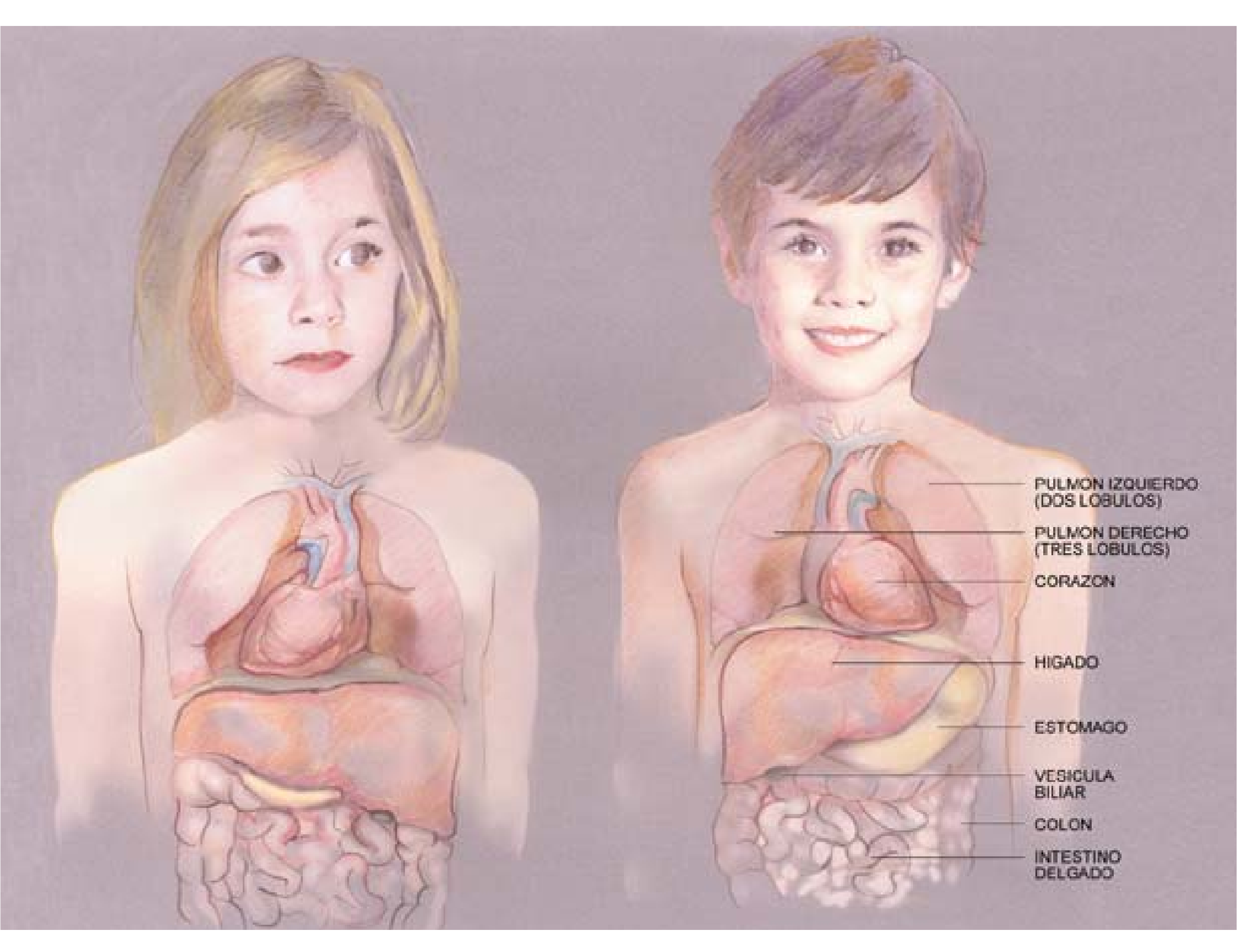
A partir de tales descubrimientos se ha esbozado un modelo de interacciones genéticas que explican el mecanismo en virtud del cual los patrones asimétricos de la expresión de algunos genes embrionarios se traducen en el desarrollo de futuros órganos asimétricos.

Se han identificado genes responsables de la estructura y la orientación de la asimetría de los animales vertebrados. También se ha comprobado que, cuando alguno de estos genes no aparece o si se activa en un lugar incorrecto, se producen malformaciones congénitas en la disposición espacial de los órganos y tejidos corporales. Por tanto, si conociéramos el modo de acción de los genes implicados en este proceso, podríamos diseñar la estrategia adecuada para prevenir muchas enfermedades o incluso curarlas.

Un sitio para cada cosa...

Los vertebrados adquirieron una disposición asimétrica de los órganos porque les reportó ventajas evolutivas indudables. Sea, por ejemplo, el sistema digestivo de los vertebrados superiores, que es muy complejo. Si el tubo digestivo sigue un patrón asimétrico de giros, podrá empaquetarse de una manera más eficiente en el interior del organismo. Por razones similares un corazón asimétrico bombea y distribuye mejor la sangre. La asimetría cardiaca permite dos sistemas de bombeo distintos: uno para dirigir la sangre a los pulmones, donde capta oxígeno y elimina dióxido de carbono, y otro para transportar la sangre reoxigenada a todo el cuerpo.

No es raro que los órganos internos asimétricos aparezcan simétricos, sin que ello suponga un gran menoscabo de su funcionamiento. Aproximadamente una de cada 8000 a 25.000 personas nace con una malformación llamada *situs inversus*. En esa condición todos los órganos internos se encuentran exactamente en el lado opuesto al que sería su situación normal (conocido como *situs solitus*); así, el corazón y el estómago estarían en la derecha, el hígado a la



1. EL NIÑO CON LA DISPOSICION NORMAL de órganos (*situs solitus, derecha*) tiene el corazón orientado a la izquierda, el hígado en la derecha, un pulmón derecho con tres lóbulos y un pulmón izquierdo con dos. El colon, asimétrico también, gira en sentido horario. Se han dado los primeros pasos para identificar los genes reguladores de la disposición y estructura asimétrica de los órganos internos. La niña que nace con *situs inversus* (*izquierda*) presenta los órganos internos dispuestos en imagen especular respecto de la posición normal. Se trata de una alteración que habitualmente no es fatal. Pero los problemas no tardan en aparecer cuando se nace con dos lados izquierdos o dos lados derechos; en ese caso, el corazón y otros órganos asimétricos se forman simétricos y no funcionan de modo adecuado.

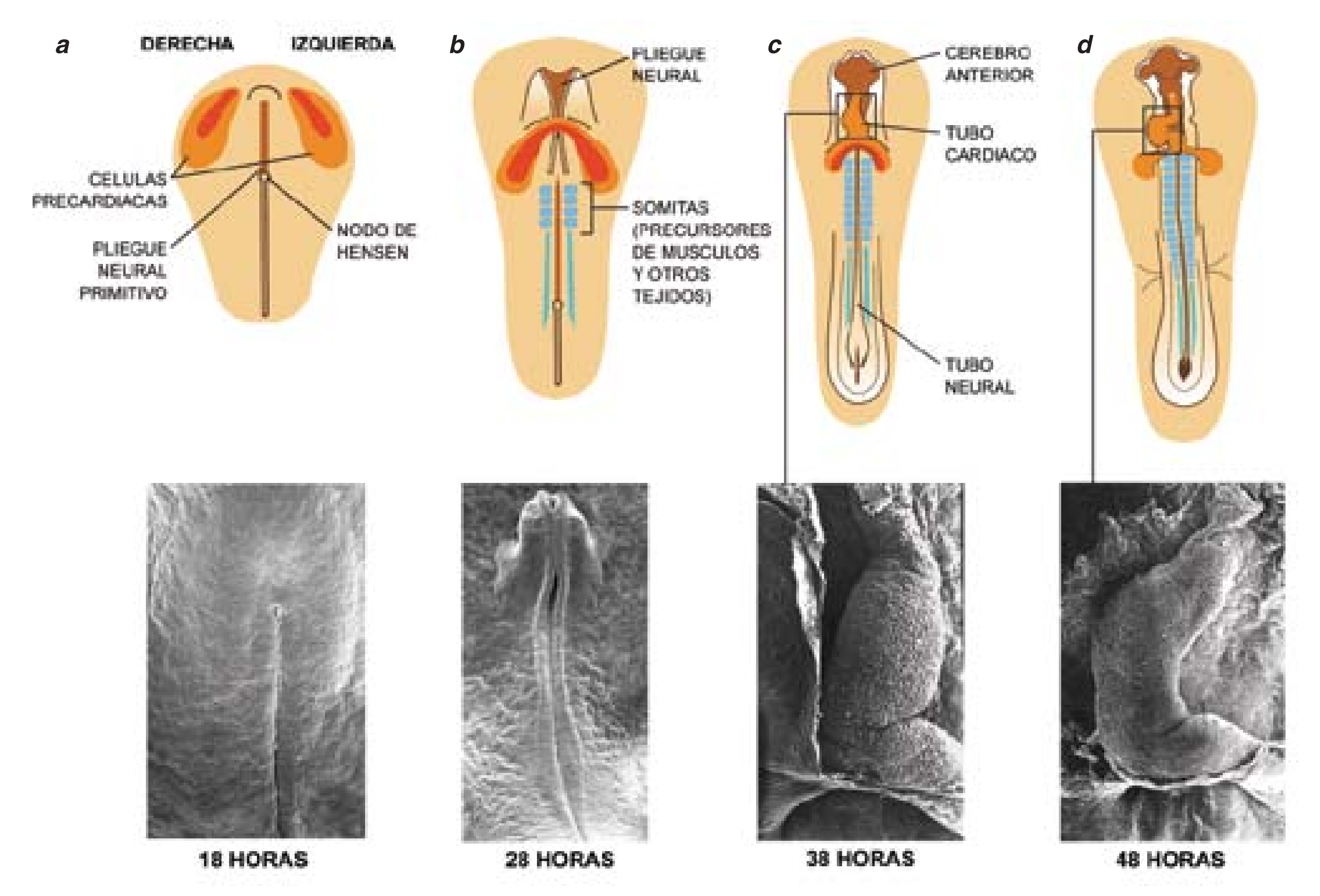
izquierda, etcétera. Estas personas no suelen presentar ningún problema incompatible con la vida. Por tanto, mientras todos los órganos de un individuo giren y se sitúen con un patrón específico o una lógica interna, no parece importar mucho el sentido del giro.

...Y cada cosa en su sitio

Menos afortunadas son las personas que nacen con algunos de sus órganos en lugar anómalo, sin ser imagen especular de la situación normal. Estos individuos presentan lo que se denomina *situs ambiguus*; les espera una muerte precoz por complicaciones cardiacas o pulmonares. Los nacidos con *isomerismo* poseen un cuerpo con dos partes izquierdas o dos partes derechas; pueden tener, por ejemplo, dos bazos o ninguno. En ellos el corazón es totalmente simétrico. La gama de malformaciones asociadas a tal condición resulta bastante compleja. Por razones que todavía no están muy claras, las personas con isomerismo izquierdo tienen mucho mejor pronóstico que los nacidos con isomerismo derecho.

En el marco de la investigación de los estadios tempranos del desarrollo del corazón en embriones se han descubierto algunos de los mecanismos que controlan la asimetría izquierda-derecha. Se ha escogido ese órgano como objeto de estudio por ser el más propenso a sufrir malformaciones, así como el primero en el que se pone de manifiesto la asimetría izquierda-derecha.

Todos los organismos adultos asimétricos comienzan siendo embriones simétricos. En los estadios iniciales de su desarrollo embrionario los vertebrados muestran si-



2. EL EMBRION TEMPRANO de pollo se desarrolla con el tubo cardiaco (precursor del corazón) doblándose hacia el lado derecho del organismo. Ocurre así en todos los vertebrados. El tubo cardiaco procede de dos poblaciones simétricas de células (*rojo* y *naranja en a* y *b*), que migran desde la superficie del embrión hasta un pliegue situado encima del nodo de Hensen. Tras la fusión de las poblaciones, el tubo resultante, simétrico al principio, comienza pronto a doblarse desplazándose asimétricamente hacia la derecha (*c* y *d*). Bajo cada diagrama se ofrecen imágenes correspondientes a los estadios comentados, obtenidas con un microscopio electrónico de barrido.

metría bilateral, con un lado izquierdo idéntico al derecho. Pero llegado cierto momento, se rompe la simetría. El primer indicio de tal rotura en los vertebrados se manifiesta durante el desarrollo temprano del corazón.

El corazón procede de dos grupos simétricos de células precardiacas (los primordios cardiacos) que se fusionan conforme avanza el desarrollo hasta constituir un tubo completamente simétrico. La primera asimetría visible es la curvatura del tubo hacia la derecha, "giro" que supone uno de los momentos cruciales en la formación del corazón porque determina la estructura interna de los dos sistemas de bombeo.

Sonic Hedgehog

En 1995, el grupo encabezado por Clifford J. Tabin, de la Universidad de Harvard, y el de Claudio D. Stern, de la Universidad de Columbia, identificaron uno de los factores bioquímicos que inducen el giro del tubo del corazón en desarrollo. Descubrieron en embriones de pollo que la proteína determinada por el gen *Sonic Hedgehog* era necesaria para la realización de dicho giro. (Identificado primero en la mosca de la fruta, el gen recibió en ésta el nombre de *Hedgehog*, porque su ausencia provoca la aparición de larvas redondeadas y puntiagudas, como erizos —Hedgehog en inglés— asustados. Una coincidencia más prosaica, la aparición del videojuego "Sonic the Hedgehog", inspiró la denominación del gen de pollo.)

Tabin y Stern observaron que el giro a la derecha ocurría sólo cuando la proteína Sonic Hedgehog se segregaba exclusivamente en el lado izquierdo del nodo de Hensen. (En esta estructura nodal las células del embrión temprano de pollo migran por debajo de otras células para crear un embrión tridimensional; se trata de un proceso que se da también, de una manera muy parecida, en los mamíferos.) Si Sonic Hedgehog se sintetiza en el lado derecho del nodo, cambia la curvatura del corazón, que ahora se realiza hacia la izquierda.

Pero Sonic Hedgehog no es la única proteína que participa en la determinación de la asimetría izquierda-derecha del corazón de los vertebrados. Intervienen también las proteínas Nodal y Lefty, que se segregan exclusivamente en la parte izquierda del embrión, así como las proteínas Activin βB, Snail y

el factor de crecimiento de fibroblastos-8, que lo hacen en la derecha. Cuando tales proteínas se activan en el lugar correcto y en el momento adecuado del desarrollo, los órganos ocupan su posición normal; pero si se alteran su lugar o tiempo de activación, se producen anomalías.

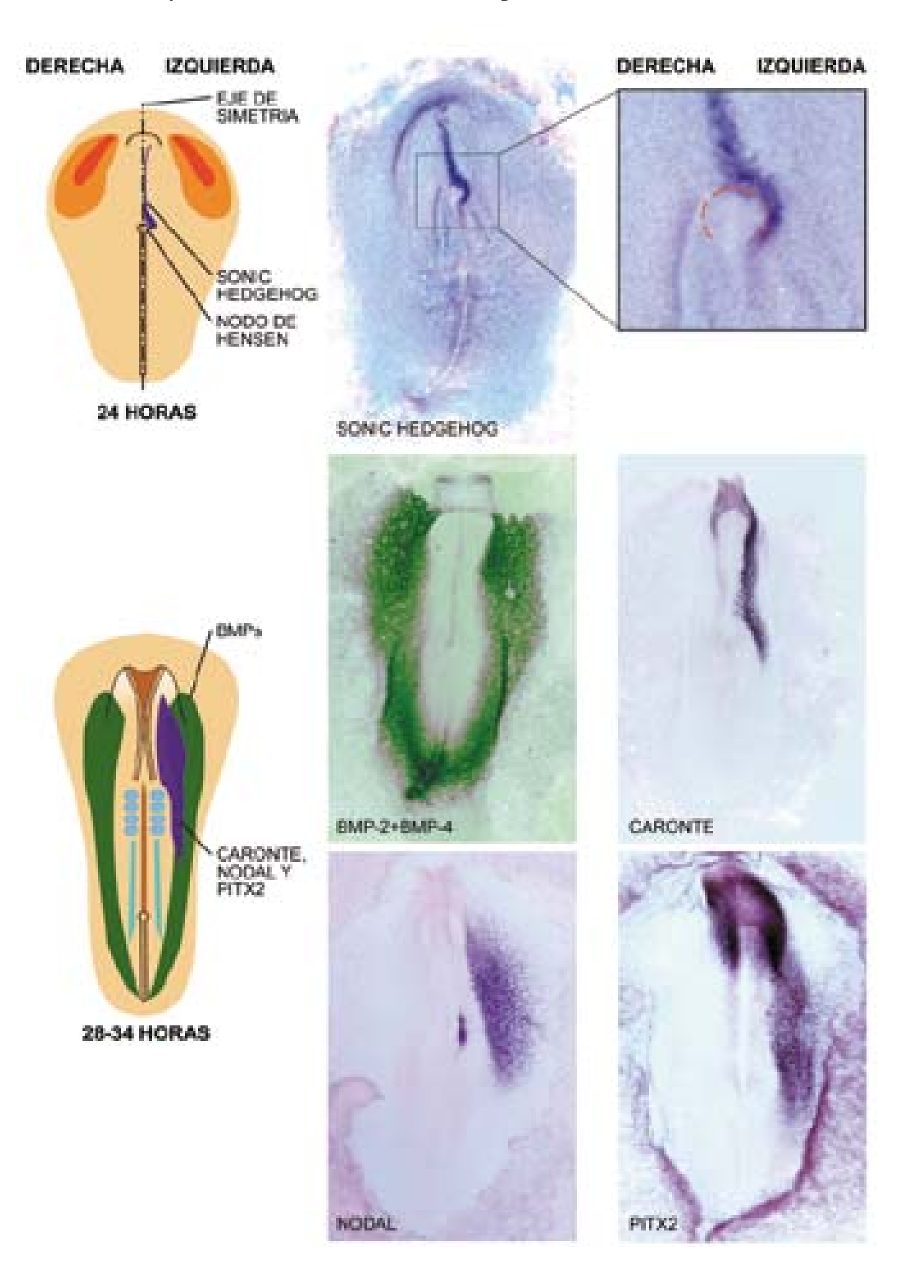
En los embriones de pollo, la presencia de Sonic Hedgehog y Nodal en la parte izquierda del nodo de Hensen, y de Activin βB en la parte derecha, originan un corazón asimétrico normal. Si se induce, por vía experimental, la activación de las proteínas Sonic Hedgehog o Nodal en la parte derecha del embrión (de suerte que ambos lados del nodo queden expuestos a Sonic Hedgehog o a Nodal), se puede anular el efecto de la Activin βB y alterar el desarrollo normal: aproximadamente la mitad de los embriones tendrán una curvatura normal del corazón, pero la otra mitad mostrará la curvatura en la dirección opuesta. La razón de tal respuesta aleatoria se debe, probablemente, a la presencia de otro factor o factores que provocan la curvatura; a Sonic Hedgehog, Nodal y Activin βB les corresponde, sin embargo, decidir la dirección seguida.

La síntesis de Sonic Hedgehog a ambos lados del nodo provoca, a su vez, la fabricación de Nodal en los dos lados. Al no existir en este caso una orden clara sobre la dirección del giro, cada embrión "decide" al azar, generando un 50 % de *situs solitus* y un 50 % de *situs inversus*.

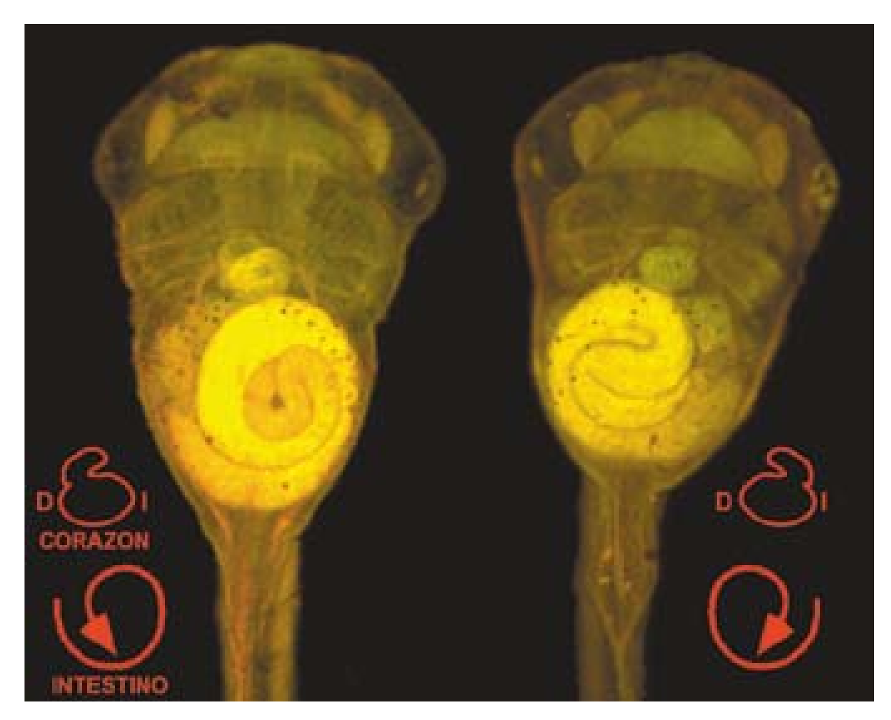
Se llega al mismo resultado cuando Sonic Hedgehog o Nodal faltan en ambos lados. Así, la ausencia absoluta de señales en el nodo de Hensen, o la presencia de las mismas a ambos lados del nodo, determinan un giro aleatorio del corazón. La síntesis de las dos proteínas requiere, como es obvio, la activación de sus genes correspondientes. Pero, aunque se sospecha que las personas con *situs inversus* o isomerismo presentan alteración en la expresión de los genes homólogos que cifran las proteínas Sonic Hedgehog o Nodal, carecemos de pruebas concluyentes.

Caronte

¿Cómo se transmite la asimetría del nodo a las zonas de su alrededor? Nuestro grupo del Instituto Salk de Estudios Biológicos en La Jolla y otros han identificado recientemente la proteína Caronte, que transmite la señal asimétrica de Sonic Hedgehog desde las inmediaciones del nodo hacia la zona lateral izquierda del embrión, donde induce la síntesis de la proteína Nodal.



3. LOS GENES QUE SE ACTIVAN sólo en un lado del embrión, como en éste de pollo, establecen la asimetría normal izquierda-derecha de los órganos internos. El gen que cifra la proteína Sonic Hedgehog (*en azul oscuro en las imágenes superiores*) es uno de los primeros que entran en funcionamiento, en el lado izquierdo del embrión, encima del nodo de Hensen. Unas diez horas después, los genes que determinan las proteínas Nodal y Pitx2 (*azul oscuro en las imágenes inferiores*) intervienen ya en la zona izquierda del embrión. En el intervalo, la información sobre la asimetría se transmite gracias a la proteína Caronte (*azul oscuro en las imágenes del centro*), sintetizada de un modo exclusivo en el lado izquierdo y en respuesta a Sonic Hedgehog. Caronte permite la expresión de Nodal en el mismo lado e inhibe las BMP (*en verde en las imágenes centrales*), que impiden, a su vez, la síntesis de Nodal.



4. EN EL RENACUAJO NORMAL, el corazón se dobla hacia el lado derecho y el tubo digestivo gira en sentido antihorario (*izquierda*). La razón de ello estriba en el gen *Pitx2*, que sólo se activa en el lado izquierdo del animal. Cuando se activa el gen *Pitx2* en el lado derecho, pueden aparecer alteraciones como las observadas en el renacuajo de la derecha, cuyo corazón se dobla hacia el lado izquierdo y el tubo digestivo gira en sentido horario. Desconocemos el mecanismo en cuya virtud la proteína Pitx2 controla estos patrones de giro.

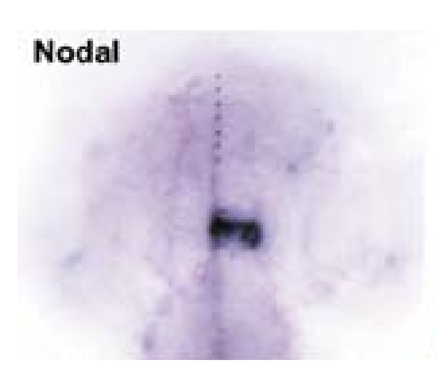
En ambas zonas laterales, izquierda y derecha, se fabrican factores de morfogénesis de hueso, o BMP. Constituyen éstos un grupo de proteínas que actúan de forma muy diversa en distintas fases del desarrollo. Las BMP pueden bloquear la activación de Nodal durante el desarrollo embrionario. La proteína Sonic Hedgehog promueve, en la parte izquierda del embrión, la síntesis de Caronte, inhibidora, a su vez, de las BMP. El resultado final de esta secuencia de interacciones genéticas da lugar a que en el lado derecho la presencia de BMP inhiba la producción de Nodal. En el lado izquierdo, por contra, la presencia de Sonic Hedgehog en las inmediaciones del nodo favorece la síntesis de Caronte, que, al bloquear las BMP, facilita la expresión de Nodal. Mediante este mecanismo se agranda una pequeña asimetría inicial, lo que determina que haya extensos dominios de genes expresados sólo en un lado del embrión.

Pitx2

¿Cuál es el agente que controla la forma y colocación asimétrica de los órganos restantes? En 1998, varios grupos, incluido el nuestro, identificaron por separado un gen que podría encerrar la respuesta. Se trata del gen que determina la proteína Pitx2.

Igual que sucedía con Sonic Hedgehog y Nodal, la proteína Pitx2 se expresa en el lado izquierdo del corazón en desarrollo e influye en su sentido de giro. Pero a diferencia de ellas, Pitx2 continúa expresándose asimétricamente en estadios más avanzados del desarrollo. En concreto, su activación persiste en el lado izquierdo de los órganos que son asimétricos. Si se manipula la síntesis celular de Pitx2 introduciendo copias extra del gen en el embrión, se produce o isomerismo o la rotación invertida del intestino y de otros órganos, así como del corazón; que resulte isomerismo o rotación invertida dependerá probablemente de la cantidad de proteína existente.

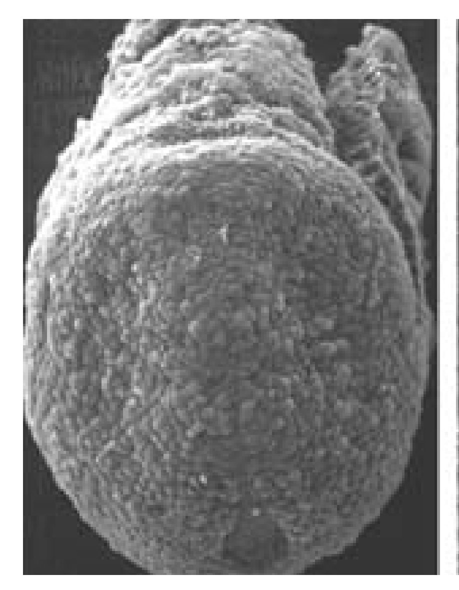
De tales trabajos, junto con otros experimentos de inactivación del gen *Pitx2* que realizamos en colaboración con M. G. Rosenfeld, de la Universidad de California en San Diego, se infiere que la proteína

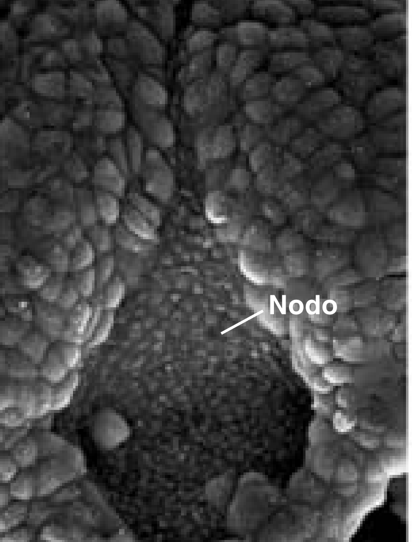


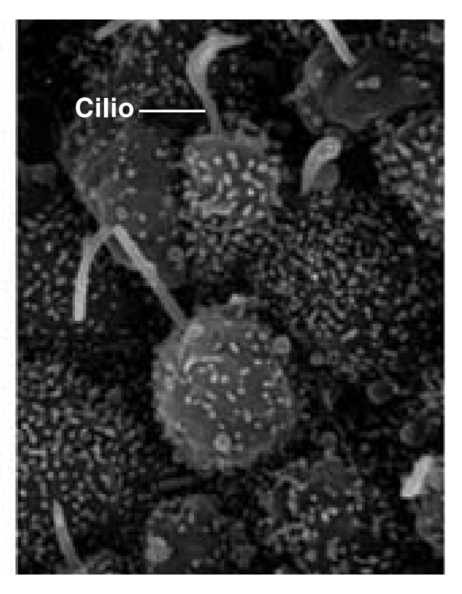




5. EN EL PEZ CEBRA, los genes homólogos de *Nodal* (*Cyclops*), *Pitx2* y *Lefty* (*Activin*) regulan el establecimiento de la asimetría izquierda-derecha. El mecanismo recuerda al descrito para pollo. Participan, además, en la determinación de la asimetría de ciertas estructuras cerebrales, como la glándula pineal. La expresión de las proteínas cifradas por tales genes se encuentra limitada a la parte izquierda del diencéfalo. Este descubrimiento constituye la primera prueba morfológica de asimetría izquierda-derecha en el desarrollo del cerebro de vertebrados.







6. EL NODO DEL EMBRION de ratón dibuja una zona hundida cuando se observa en el microscopio electrónico de barrido (*izquierda*). Esta zona es similar al nodo de Hensen del embrión de pollo. A mayor aumento (*centro*) se aprecia que todas las células del nodo presentan una estructura ciliada, ilustrada en la imagen de la derecha. Cada cilio realiza un movimiento de rotación exclusivamente antihorario, para mantener, suponemos, en el lado izquierdo del embrión las proteínas importantes en el establecimiento de la asimetría izquierda-derecha.

Pitx2 es uno de los primeros factores que establecen la noción de izquierda durante el desarrollo de los vertebrados. No hemos logrado, sin embargo, aclarar todavía el mecanismo en cuya virtud Pitx2 y otros factores determinan que el tubo cardiaco se doble, que el intestino gire o que el cerebro se desarrolle asimétricamente.

Existen grandes esperanzas de que se avance en la comprensión de tales procesos gracias a los estudios que se están llevando a cabo en un organismo modelo prometedor: el pez cebra. Ya se han identificado genes homólogos a *Nodal*, *Lefty* y *Pitx2*, entre otros, y se ha comprobado que desempeñan un papel similar al descrito en el pollo. Además, la presencia de numerosos mutantes de este pez, que manifiestan malformaciones características, ha servido para caracterizar los mecanismos reguladores de la asimetría en el desarrollo de estructuras cerebrales.

En colaboración con M. E. Halpern, de la Institución Carnegie de Washington en Baltimore, hemos averiguado que los genes homólogos de *Nodal*, *Lefty* y *Pitx2* se expresan sólo en el lado izquierdo de una zona del cerebro que posteriormente dará lugar a la glándula pineal. Aunque se conoce desde hace tiempo el carácter asimétrico del funcionamiento cerebral, con los hemisferios especializados en tareas específicas, la nuestra constituye la primera prueba real de asimetría morfológica; sugiere, además, que los mecanismos implicados en el establecimiento de esta asimetría izquierda-derecha del cerebro son comunes a los descritos para los órganos internos del abdomen y el tórax.

Rotura de la simetría

Queda asimismo por conocer el agente en cuya virtud se establece la asimetría inicial del cuerpo. ¿Qué es lo que induce inicialmente la producción de Sonic Hedgehog, Activin βB o Lefty? Se ha propuesto la vitamina A. Desde hace unos años se sabe que la vitamina A afecta a ciertas células embrionales e influye en la capacidad del embrión para distinguir entre izquierda y derecha, arriba y abajo, delante y detrás.

La investigación realizada por nuestro grupo y por otros laboratorios ha puesto de manifiesto que el exceso de ácido retinoico, una forma de vitamina A, puede anular la asimetría normal del corazón en roedores y aves. La explicación bioquímica subyacente es clara: el ácido retinoico es capaz de alterar la síntesis de las proteínas Nodal, Pitx2 y Lefty.

En la rotura de la asimetría inicial del embrión hay otros factores implicados, además de la vitamina A. Desempeñan un papel destacado los cilios. Estas estructuras con forma de látigo sobresalen de la membrana externa de las células que tapizan el intestino y las vías respiratorias; a los cilios les deben los espermatozoides su movilidad. Observadas al microscopio electrónico de barrido, las células del nodo del embrión de ratón evidencian un cilio central, único y móvil. Estas células ciliadas apuntan hacia la parte ventral del embrión.

Los primeros indicios de la participación de los cilios en el establecimiento de la asimetría izquierda-derecha aparecieron en el estudio del síndrome de Kartagener. Los pacientes que lo sufren presentan cilios defectuosos en varios tipos celulares, incluidos los espermatozoides. Los afectados por el síndrome se muestran proclives a las infecciones respiratorias (sin cilios funcionales no pueden expulsarse los patógenos de las vías aéreas); los varones son estériles. Además, estos pacientes presentan una alta incidencia de *situs inversus*.

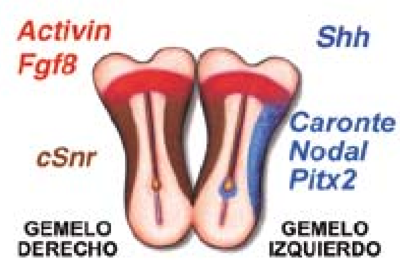
La investigación ulterior aportó pruebas de la relación entre la rotura de la simetría corporal y el movimiento ciliar. Se ha comprobado, por ejemplo, que la mutación en el ratón de una proteína estructural de los cilios da lugar a una disposición aleatoria del corazón o los pulmones. La ausencia de cilios funcionales en el nodo podría quizás explicar la instalación aleatoria de los órganos.

El efecto látigo

Comenzamos a entender, en efecto, el control de los cilios del nodo sobre la instalación correcta de los órganos en el cuerpo. (Las células del nodo extienden los cilios hacia el fluido que rodea el embrión.) En 1998, Nobutaka Hirokawa y su equipo, de la Universidad de Tokio, descubrieron que las células del nodo de ratón generan una rotación de los cilios en sentido antihorario, con un movimiento unidireccional que nunca se había descrito en ningún otro tipo de cilio.

Ese movimiento unidireccional resulta determinante. Crea, a su vez, un flujo de líquido que podría barrer factores críticos, como el ácido retinoico y las proteínas Nodal y Lefty, hacia el lado izquierdo de la estructura nodal. De ese modo, la acumulación de líquido y proteínas en el lado izquierdo podría producir el desequilibrio necesario para romper la simetría inicial del embrión. En otras palabras, una característica de la arquitectura celular (la dirección de rotación de los cilios en el nodo) se traduce en un desequilibrio entre izquierda y derecha en el desarrollo embrionario, que al final acaba estableciendo la forma y lugar en que se desarrollan nuestros órganos internos.





7. ALGUNOS GEMELOS SIAMESES tienden a desarrollar alteraciones en la posición de los órganos, tendencia que depende del lugar por donde se hallan físicamente unidos. Cuando la unión es por el costado (gemelos diencefálicos), como Abigail y Brittany Hensel (*izquierda*), en la mitad de ellos un gemelo (por lo común el situado a la derecha del otro) presenta alteraciones en la disposición de los órganos de la cavidad interna. Como todos los siameses, los gemelos diencefálicos se forman a partir de un solo ovocito fecundado, que se divide de modo incompleto. En este caso, los dos embriones están situados, paralelos, uno al lado del otro. En razón de tal proximidad los factores producidos en el nodo del gemelo de la izquierda podrían influir sobre el otro gemelo. En consecuencia, los genes que se han descrito en el artículo, y que se activan en el lado izquierdo, sólo se encontrarían en el gemelo izquierdo, mientras que el gemelo derecho presentaría dos lados derechos.



8. EL CORAZON EN DESARROLLO (*rojo*) de embriones de pollo muestra la importancia de la vitamina A en la disposición normal de este órgano. Cuando la concentración de ácido retinoico, una forma de la vitamina A, es normal, el tubo cardiaco se dobla hacia la derecha (*imagen izquierda*). Si aumentamos la concentración de ácido retinoico en el embrión aparecen alteraciones en el desarrollo normal del corazón, que puede no realizar el giro (*imagen central*) o incluso llevarlo a cabo en la dirección contraria, es decir, hacia la izquierda (*imagen derecha*). En esas observaciones se basa la hipótesis de que el ácido retinoico ayuda a regular la actividad de genes como *Nodal*, que a su vez deciden la asimetría izquierda-derecha.

Se desconoce la razón de que los cilios giren en sentido antihorario. En teoría podría atribuirse a las moléculas asimétricas que producen el movimiento de los cilios. Pero en la mitad de los sujetos (humanos o ratones) que carecen de cilios se observa una disposición asimétrica normal de los órganos. Por consiguiente, los cilios del nodo no son imprescindibles para que se desarrollen los órganos, pero sí son necesarios para establecer los gradientes moleculares requeridos en la correcta orientación y posición de los órganos.

Si no hay cilios, no se produce flujo de líquido que desequilibre la simetría inicial; las moléculas que determinan la izquierda y la derecha se acumulan por igual en ambos lados del nodo. En este caso, la disposición de los órganos se decide al azar, dependiendo probablemente del predominio de uno

u otro tipo de moléculas en un lado u otro del nodo.

Colofón

El problema de la determinación izquierda-derecha en el embrión despertó el interés de los investigadores hace mucho tiempo. Pero los decenios se sucedían sin progresos claros. No se contaba con herramientas moleculares. El descubrimiento reciente de genes con actividad asimétrica en el embrión nos ha proporcionado pistas muy sólidas. Cuando se identifica un gen implicado en un proceso relacionado con el desarrollo, se promueve su activación o inhibición en distintas partes del embrión. Tal operación, acometida en el laboratorio, se propone someter a comprobación la hipotética función atribuida a la proteína codificada por el gen.

Seguimos sin conocer la naturaleza exacta del agente que establece la asimetría del embrión. Pero la identificación de las proteínas que intervienen tras ese paso inicial facilitará el descubrimiento de otras proteínas implicadas en aspectos diversos del desarrollo de los órganos. El conocimiento de estas otras proteínas probablemente conducirá a la identificación de nuevas mutaciones que predisponen para sufrir malformaciones congénitas específicas, lo que, a su vez, propiciará el desarrollo de nuevos métodos de diagnóstico prenatal.

Bibliografía complementaria

LEFT-RIGHT ASYMMETRY IN VERTEBRATE EMBRYOGENESIS. M. Levin en *Bioessays* n.º 19, págs. 287-296; 1997.

THE DEVELOPMENT OF HANDEDNESS IN LEFT-RIGHT ASYMMETRY. N. A. Brown y L. Wolpert en *Development*, n.º 109, págs. 1-9; 1990.

MECHANISMS OF LEFT-RIGHT DETERMINATION IN VERTEBRATES. J. Capdevila, K. J. Vogan, C. J. Tabin y J. C. Izpisúa Belmonte en *Cell*, n.º 101, págs. 9-21; 2000.

CONSERVED AND DIVERGENT MECHANISMS IN LEFT-RIGHT AXIS FORMATION. R. D. Burdine y A. F. Schier en *Genes Dev.*, n.º 14, págs. 763-776; 2000.



Veinticinco años de ciencia y técnica en España: institucionalización e infraestructuras

Angel Pestaña

Los acontecimientos del último cuarto del siglo XX en España no se agotan en el campo de lo político. Los cambios operados en numerosos aspectos de la dinámica económica y social dejan su sello en la ciencia y la técnica, impronta que vamos a analizar en este artículo, atendiendo tanto al proceso de su institucionalización como a las innovaciones en las infraestructuras que le sirven de soporte.

Como es sabido, las iniciativas estatales en ciencia y técnica se organizan, tras la guerra civil, en torno al Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC). Modelado sobre el precedente francés —Centre National de la Recherche Scientifique (CNRS)— el CSIC acapara en sus orígenes las funciones de asesoramiento, fomento, orientación y coordinación de la investigación científica nacional (lo que en politología científica se identifica como niveles I y II), a lo que se añade la ejecución de actividades de investigación y desarrollo (nivel III), a través de sus 118 centros propios y 107 centros coordinados o subvencionados en distintas universidades. Además de su disposición a cultivar las distintas ramas del árbol de la ciencia, el CSIC representa entonces un anticipo de los actuales centros técnicos a través de sus institutos agrupados en el extinto Patronato "Juan de la Cierva".

A partir de 1953, al calor de los cambios originados por el desenlace de la segunda guerra mundial y la alianza con Estados Unidos para el establecimiento de bases militares norteamericanas en el territorio español, se acometen una serie de acciones —créditos para infraestructura del Banco Mundial para el Desarrollo y de la norteamericana Fundación Nacional para la Ciencia, programa de becas para formación de personal investigador, contratos de empresas estadounidenses con centros de investigación españoles— que van a suponer un impulso importante para el desarrollo del sistema de ciencia y técnica.

Desde el punto de vista institucional, el hito más importante de este período corresponde a la creación en 1961 de la Comisión Asesora de Investigación Científica (CAICYT), adscrita al Ministerio de la Presidencia del Gobierno, como instrumento para fomentar la investigación científica y el desarrollo técnico (I+D) en el contexto de los Planes de Desarrollo.

También se sitúa en ese año el decreto de creación de las Asociaciones de Investigación Industrial, embrión de los actuales centros de innovación. La CAICYT gestiona a partir de 1965 los Fondos Nacionales para el Desarrollo de la Investigación Científica, que se distribuyen entre subvenciones a proyectos de investigación básica y aplicada, infraestructura y acciones concertadas de investigación y desarrollo. Sin embargo, la cuantía de estos fondos es muy pequeña, de forma que hasta 1975 no se superan los mil millones de pesetas corrientes.

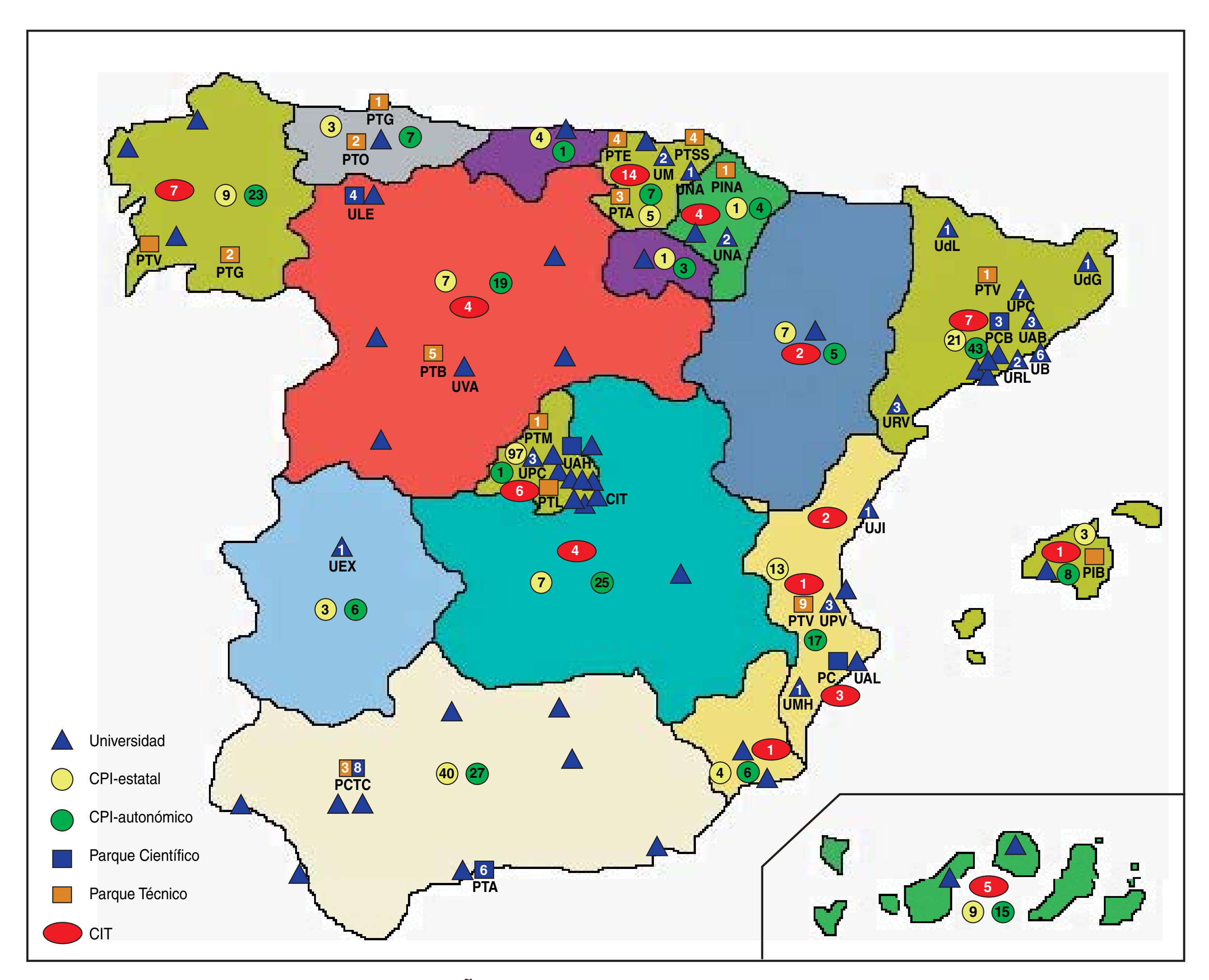
Desde 1975 se suceden algunos cambios importantes en el sistema español de ciencia y técnica, principalmente a partir de la creación en 1977 del Centro para el Desarrollo Tecnológico e Industrial (CDTI), adscrito al Ministerio de Industria (MIN). Constituido inicialmente con un crédito del Banco Internacional de Reconstrucción y Desarrollo, el CDTI se va consolidando como instrumento para estimular la investigación industrial, sobre la base de créditos blandos y subvenciones, a proyectos I+D empresariales. Por estas fechas también se amplían las competencias investigadoras del Ministerio de Educación, rebautizado como Ministerio de Educación y Ciencia (MEC), con la responsabilidad de la gestión del Fondo Nacional de Investigación, vía CAICYT a través de la nueva Dirección General de Política Científica.

Tales cambios institucionales cementan un modelo bipolar en la gestión estatal de la ciencia y la técnica, fuente de tensiones y descoordinaciones, cuya resolución va a requerir de repetidas reformas institucionales. A este período corresponde también una

El autor

ANGEL PESTAÑA es investigador del CSIC en el Instituto de Investigaciones Biomédicas, donde dirige un grupo de trabajo sobre genética molecular del cáncer humano. También está interesado en las consecuencias sociales y económicas de la actividad científica y en la valoración de la ciencia como un producto susceptible de cuantificación.

La evolución del sistema español de ciencia y técnica en el último cuarto de siglo se ha caracterizado por un importante crecimiento del sector universitario, la asunción de competencias I+D por parte de las Comunidades Autónomas y la afloración de fondos estructurales europeos



1. GEOGRAFIA DE LA INNOVACION EN ESPAÑA. La figura muestra la distribución de las infraestructuras de investigación y desarrollo técnico (I+D) en las distintas Comunidades Autónomas, incluyendo universidades, centros públicos de investigación (CPI) de titularidad estatal y autonómica, centros de innovación técnica (CIT) y otros centros técnicos (CT), parques técnicos y parques científicos. Los números dentro de los símbolos corresponden a los CIT y CT establecidos en los parques o en un entorno universitario. Los datos proceden del catálogo de universidades en la RedIRIS, catálogo de organismos públicos de investigación del CSIC, miembros de la FEDIT (Federación de entidades de innovación), miembros de la APTE (Asociación de parques técnicos), relación de centros CIT acreditados por la CICYT y catálogo de centros I+D, también de la CICYT.

dinamización de la investigación en las universidades, que sustituyen la hegemonía del CSIC de épocas anteriores. Fiel reflejo de esta nueva situación es la Ley de Reforma Universitaria (1983) que viene a consolidar la figura del docente-investigador, a la par que establece incentivos económicos para su participación en proyectos coordinados con empresas.

La llegada del Partido Socialista al poder inaugura un período de gran dinamismo para el sistema I+D con un crecimiento notable del Fondo Nacional para el Desarrollo de la Investigación que se complementa, tras el ingreso en la Comunidad Europea, con la entrada de fondos de investigación desde el extranjero —formalmente retornos de las aportaciones españolas— equivalentes en cuantía a los del Fondo Nacional. Además de los compromisos económicos estatales para la financiación de la I+D, se producen en este período unos cambios importantes en el marco

PARQUES TECNOLOGICOS Y CIENTIFICOS EN ESPAÑA

CCAA	PARQUE O ENTORNO (*)	DEPENDENCIA	CENTROS O ENTIDADES I+D (**)
ANDALUCIA	PCT Cartuja93 (Sevilla)	Soc. Estatal y Junta de Andalucía	4 Inst., 3 CT (USE), 3 CIT, Centro Nac. Aceleradores
	PT Andalucía (Málaga)	Univ. Málaga (UMA) y Junta de Andalucía	6 CT Junta-UMA
	Campus Sanitario (Granada)	Universidad de Granada (UGR)	¿Institutos universitarios?
ASTURIAS	PT Asturias (Oviedo)	Gobierno regional	1 CIT
	PCT Gijón	Ayuntamiento	1 CT (UOV)
BALEARES	Parque Innovación	Gobierno Balear	Sin datos
CASTILLA Y LEON	PT Boecillo (Valladolid)	Junta Castilla y León	5 CIT
	PC León (*)	Universidad de León (ULE)	4 Institutos I+D (ULE)
CATALUÑA	PT Vallés	Generalitat-Zona Franca	Fundación ASCAFAMM Empresas I+D
	PC Barcelona	Fundación Bosch Gimpera Univ. de Barcelona (UB)	Centro Innovación 2 Institutos I+D (UB)
	Campus Tecnológico (*)	UPC (Barcelona y Terrassa)	9 CT
	Campus Agroalimentario	Universidad de Gerona (UdG)-IRTA-SEMEGA	
COMUNIDAD VALENCIANA	PT Valencia (*)		8 CIT
	Campus Tecnológico (*)	Universidad Politécnica (UPV)	3 CT (IU)
	PC Alicante	Proyecto Univ. Alicante	¿Institutos universitarios?
GALICIA	PT Galicia (Orense)	Xunta	2 CT
	PT Vigo	Zona Franca y Ayuntamiento	Empresas
MADRID	PTM y entorno Tres Cantos	Gobierno Regional y Ayuntamiento	1 CPI Empresas I+D
	PT Leganés (*)		¿Institutos Universitarios?
	PCT Alcalá	Comunidad de Madrid y UAH	Sin datos
NAVARRA	P. Innovación (*)	Gobierno Foral	1 CT
PAIS VASCO	PT Vizcaya	Gobierno Vasco, Diputación Foral	4 CIT
	PT San Sebastián	Gobierno Vasco, Diputación Foral, Kutzka	3 CIT
	PT Alava	Gobierno Vasco, Diputación Foral	2 CIT
	Campus Tecnológico Mondragón (*)	UMO-Corporación Mondragón	2 CIT

(*) Incluye parques que no se relacionan en el listado FEDIT, incluyendo algún campus universitario con una actividad importante en investigación tecnológica.

(**) Incluye centros de innovación del catálogo CICYT (CIT), Centros Tecnológicos (CT), dependientes de universidades (IU) y centros públicos de investigación (CPI) de fuerte contenido tecnológico.
Los acrónimos utilizados para las universidades son los del Consejo de Universidades.

institucional debido al desarrollo de las competencias autonómicas en investigación, la ya mencionada promulgación de la Ley de Reforma Universitaria (LRU) y la Ley de Fomento y Coordinación General de la Investigación Científica y Técnica (vulgo Ley de Ciencia) en 1986.

La asunción de las competencias de fomento de la investigación por las Comunidades Autónomas —artículo 148.1 de la Constitución— es un proceso desigual y todavía inconcluso en el que destacan Andalucía, Asturias, Cataluña, Galicia, Madrid, Navarra, Comunidad Valenciana y País Vasco, por disponer de una elaborada normativa específica y planes regionales de investigación. Cataluña se adelanta en 1980 al dotarse de un organismo de planificación y coordinación interdepartamental (Comissió Interdepartamental de la Recerca i Innovació Tecnológica, CIRIT). Además, su Estatuto de Autonomía tensó al máximo la dualidad constitucional en la distribución de competencias sobre fomento de la investigación entre Comunidades Autónomas y el Estado, al atribuirse esa comunidad unas competencias exclusivas que el artículo 149.1 de la Constitución atribuye al Estado.

La argumentación legal del Tribunal Constitucional, en sentencia de 1992, es importante en la medida en que elimina falsos problemas de suspicacia o desconfianza mutua —riesgos de atomización de la I+D, de un lado; imposición de políticas inadecuadas a los intereses regionales, del otro— y sitúa al sistema I+D español en la perspectiva de un modelo de concertación concurrente como el existente en Alemania Federal. Esto puede resultar más complicado que un sistema centralizado, pero no necesariamente menos eficaz. Sobre todo si se acompaña de medidas para facilitar la convergencia de las regiones menos desarrolladas y se logra la articulación de un moderno sistema de innovación basado en la agrupación local de recursos I+D públicos, privados y empresariales.

La Ley de la Ciencia establece un nuevo marco institucional para desarrollar las iniciativas estatales de promoción de la I+D, coordinar esfuerzos de las distintas administraciones y reorganizar el sector público de ciencia y técnica (OPI). El instrumento principal para estas acciones es el Plan Nacional I+D (PNID), a cuyo frente se dispone una Comisión Interministerial de Ciencia y Tecnología (CICYT) garante de la coordinación sectorial, una comisión permanente y una Secretaría General para la gestión de los programas. Además, se crea un Consejo Asesor para promover la participación de los agentes económicos y sociales y un Consejo General, para la participación y coordinación del las CCAA.

De los tres objetivos principales antes indicados, sólo el de promoción de la investigación científica parece haberse desarrollado, con una duplicación del fondo nacional I+D —que pasa de 13.000 millones

de pesetas en 1986 a 24.000 millones en 1990—, junto con incrementos en los efectivos de investigación en universidades y CSIC y la resultante de una presencia creciente de publicaciones españolas en las bases de datos internacionales.

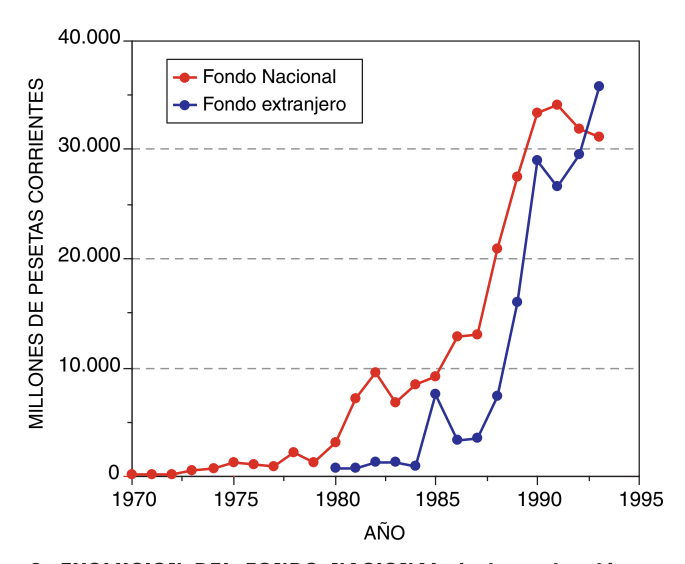
Sin embargo, la coordinación entre las distintas administraciones, incluyendo el sector público de I+D (los OPI), ha dejado mucho que desear. Por otra parte, la bipolarización entre la investigación científica y el desarrollo técnico —los dos elementos del binomio I+D— no ha sido resuelta por las estructuras administrativas puestas a punto por la Ley de Ciencia, manteniéndose la dualidad ministerio de educación/ministerio de investigación; especialmente tras la puesta en marcha del Plan de Actuación Tecnológica Industrial (PATI) que gestiona presupuestos muy superiores a los del Fondo Nacional y con total autonomía respecto de la CICYT. Por otra parte, la participación privada en el conjunto del sistema I+D ha permanecido estancado en torno al 0,4-0,5 % del PIB a lo largo de los años de vigencia del Plan Nacional.

Para hacer frente a estas insuficiencias del sistema establecido por la Ley de Ciencia, el primer gobierno del Partido Popular creó la Oficina de Ciencia y Tecnología (OCYT) bajo la autoridad del Ministerio de la Presidencia —encargado de la coordinación de los distintos ministerios— y unificó el control de la gestión de los distintos OPI. La OCYT ha tenido, como principal cometido, la gestión del Tercer Plan Nacional I+D —elaborado por el último gobierno socialista— y la elaboración del Cuarto Plan Nacional I+D+I que, por primera vez introduce explícitamente la innovación en la agenda I+D. Este importante cambio de rumbo se consolida en el gobierno resultante de las legislativas del año 2000 con la creación de un ente único administrativo —el Ministerio de Ciencia y Tecnología, MICYT— responsable de todas las actuaciones de la administración estatal en el ámbito de la investigación científica, el desarrollo técnico y la innovación. Las consecuencias prácticas de estas reformas están por ver. De momento, y para los ejecutores de la investigación científica en universidades y CSIC, el énfasis en la innovación ha supuesto una reducción de fondos y retrasos en la convocatoria de las ayudas para investigación básica.

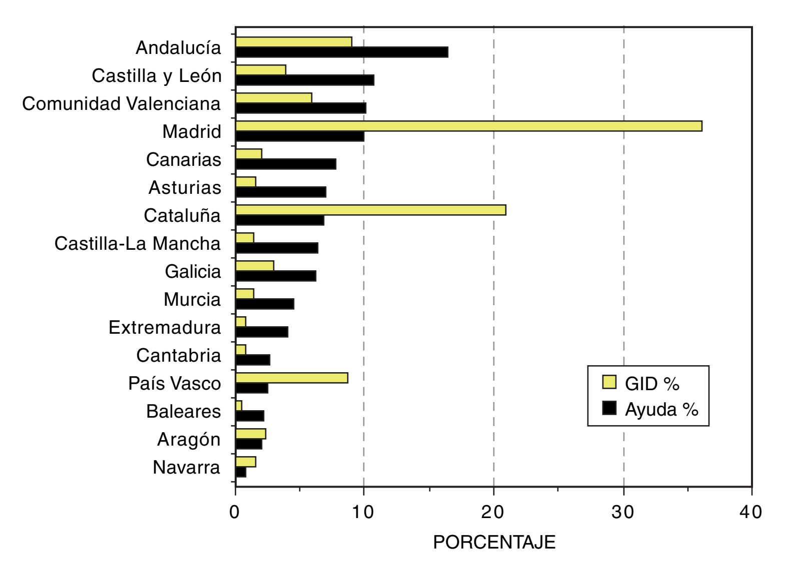
De acuerdo con las series de datos del Instituto Nacional de Estadística (INE), los gastos atribuidos a infraestructuras representan, con algunas fluctuaciones, una fracción constante en torno al 20 %, de los gastos internos totales en investigación y desarrollo (GID), lo que representa un importante crecimiento anual de los gastos internos en infraestructuras, que pasan de 4500 millones de pesetas corrientes en 1975 a 8793 en 1980, 28.891 en 1985 y 81.500 en 1990. A partir de 1990, el crecimiento en los gastos de infraestructuras I+D se enlentece, a tenor de lo que sucede con el GID, de forma que en el decenio siguiente, los gastos de infraestructura sólo se duplican, hasta la cifra de 155.000 millones en 1999. En este mismo período (1990-99), las aportaciones de los Fondos Estructurales para el Desarrollo (FEDER) de la Comisión Europea adquieren una dimensión importante en la financiación de infraestructuras científicas, representando el 20 % del gasto por este concepto en el sector público (Administración y Enseñanza Superior) y un 30 % de este capítulo presupuestario, cuando se considera conjuntamente con la cofinanciación que deben aportar las administraciones autonómicas.

Por su orientación a la convergencia regional, las ayudas FEDER han supuesto una aportación importante para mejorar y ampliar las infraestructuras I+D de las Comunidades Autónomas con menor desarrollo científico y económico. Este carácter redistributivo —dar relativamente más al que menos tiene— se pone de manifiesto en la figura 3, en la que se comparan la distribución de las ayudas FEDER y los gastos I+D de cada Comunidad Autónoma. Con la excepción de Madrid, Cataluña, País Vasco, Aragón y Navarra —regiones desarrolladas de objetivo 2— el peso de la ayuda FEDER es notablemente superior al GID autonómico. Andalucía, Castilla y León y la Comunidad Valenciana son las regiones que más ayudas FEDER han recibido; habiendo sacado un importante partido de las mismas en forma de nuevos edificios para institutos universitarios o centros técnicos de titularidad generalmente mixta. En Andalucía destacan el centro de investigación de la Cartuja (que alberga institutos mixtos CSIC-Universidad de Sevilla) y el edificio de institutos universitarios de la Universidad de Málaga, en el Parque Tecnológico de Andalucía. En Castilla y León sobresale el Centro de Investigación del Cáncer de la Universidad de Salamanca y los edificios para institutos universitarios en la remodelación del recinto de la Universidad de León, rebautizado como parque científico.

La evolución de los gastos de infraestructura por sectores de ejecución en las series históricas del INE (*véase la figura 4*) se corresponde con el proceso de institucionalización resumido en la sección anterior.



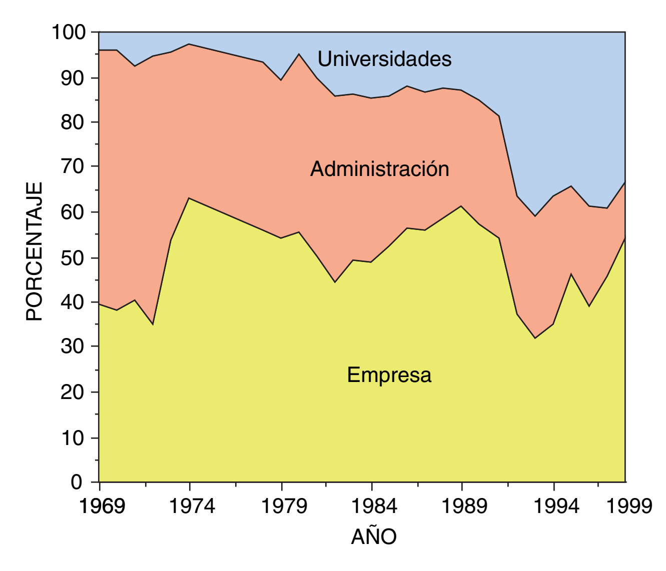
2. EVOLUCION DEL FONDO NACIONAL de investigación y de la financiación procedente del extranjero, principalmente Programa Marco y fondos FEDER (Fuentes: CAICYT y CICYT).



3. DISTRIBUCION REGIONAL DE LAS AYUDAS FEDER en comparación con la participación en los gastos internos I+D. Para las ayudas FEDER se ha computado el total gestionado por la CICYT en el período 1990-1999. Para la distribución del GID se han computado los datos del Instituto Nacional de Estadística correspondientes al período 1990-1999.

Frente a una estabilidad relativa de los gastos de infraestructura en el sector privado (Empresa), en torno al 40-50 % del total español, los gastos de infraestructura en el sector público (Administración) caen desde un 55 % en 1969 al 12 % en 1998. Por el contrario, el sector Enseñanza Superior experimenta un notable crecimiento, desde una participación del 4 % en los gastos de infraestructura I+D en 1969 a una cifra sostenida en torno al 30-35 % a partir de 1990.

Tales cambios en el peso relativo de las infraestructuras I+D entre Administración y Enseñanza se ponen de manifiesto al considerar que el número total de universidades (públicas y privadas) se ha duplicado entre 1980 y 1999 —pasando de 31 a 64—, mientras que, en ese mismo período de tiempo, el número de centros propios del CSIC se mantiene constante (118 en 1980, 117 en 1999).



4. DISTRIBUCION SECTORIAL de los gastos de infraestructura (equipamiento y edificaciones) obtenido de las series estadísticas del INE (INEbase).

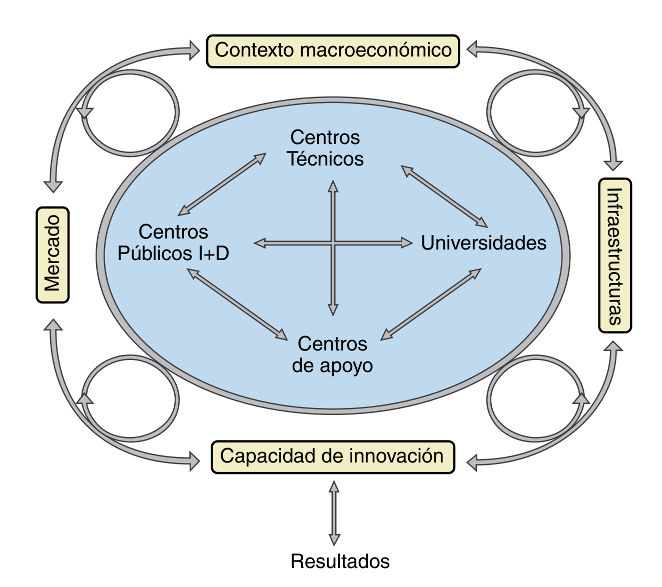
En el mismo intervalo se han producido la reestructuración y la redistribución de los centros del CSIC a expensas de Madrid, que pasa de 76 a 45 centros, si bien mantiene una posición dominante, con cerca del 40 % de los efectivos del CSIC. Las Comunidades Autónomas más favorecidas en la redistribución del CSIC son Valencia (que pasa de 2 a 9 centros), Cataluña (que pasa de 9 a 17) y Andalucía (que pasa de 13 a 20). Por el contrario, el incremento de universidades en las dos últimas décadas no se ha traducido en una apreciable redistribución regional de efectivos, de forma que ha conducido a un refuerzo de la hegemonía universitaria de Madrid y Barcelona (con 13 y 11 universidades, respectivamente) que, conjuntamente, dan cuenta del 37 % de las universidades.

Los gastos de infraestructura en la Administración no se agotan con el CSIC. Otros Organismos Públicos de Investigación (OPI) de carácter estatal, sumados a Centros Públicos de Investigación (CPI) dependientes de las administraciones autonómicas y locales, contribuyen en gran medida a este capítulo del GID. Los OPI estatales tienen como el CSIC su sede en Madrid. Algunos, así el Instituto de Salud Carlos III (ISCIII), dependiente del Ministerio de Sanidad, el Centro de Experimentación de Obras Públicas (CEDEX), dependiente del Ministerio de Fomento, el Centro de Investigaciones Energéticas y Medioambientales (CIEMAT), del antiguo Ministerio de Industria, o el Instituto Nacional de Tecnología Aeronáutica (INTA), del Ministerio de Defensa, tienen también en Madrid todos o la mayoría de sus centros. Otros, como el Instituto Geográfico Nacional (IGN), el Instituto Nacional de Meteorología (INM), ambos dependientes del Ministerio de Medio Ambiente, y el Instituto Oceanográfico (IO), dependiente del Ministerio de Agricultura y Pesca, disponen de observatorios, bases o centros distribuidos por le geografía nacional. Finalmente, el Instituto Nacional de Investigaciones Agrarias (INIA) fue transferido a las Comunidades Autónomas al principio de los 80, por lo que sus centros regionales han pasado a ser integrantes mayoritarios de los CPI autonómicos.

Como consecuencia de esta historia previa, la Comunidad de Madrid concentra una gran parte de los CPI de titularidad estatal, pero carece de los de carácter autonómico. Esta centralización de efectivos I+D estatales se ha reforzado recientemente con la creación del Centro Nacional de Investigaciones Oncológicas (CNIO) del ISCIII y el Centro de Astrobiología del INTA, en el que colaboran otras instituciones públicas y privadas.

El tercer elemento a considerar en las infraestructuras I+D son los centros técnicos, pieza fundamental de la innovación en la pequeña y mediana empresa (PYME). Surgidos algunos de ellos por evolución de las antiguas asociaciones de investigación de carácter sectorial, otros creados en respuesta a la de-

5. ECOSISTEMA DE LA INNOVACION. Basado en el modelo de sistema regional de innovación propuesto por Cooke (1998).



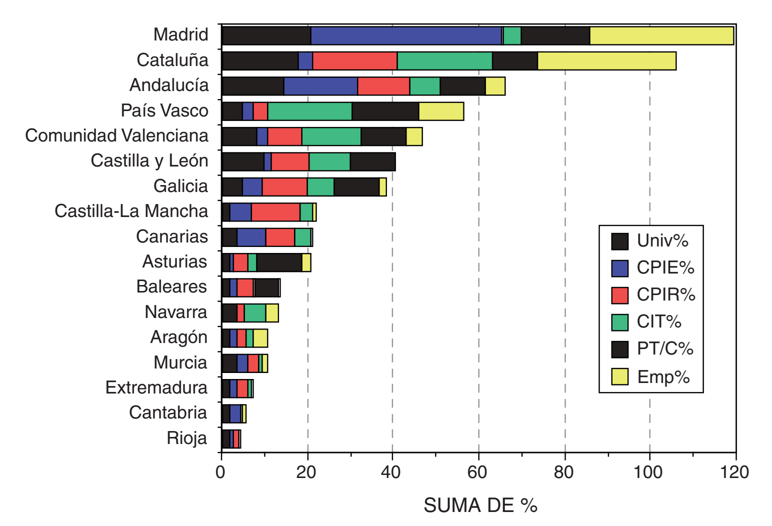
manda de servicios técnicos de las PYME, todos comparten una organización administrativa, en cuanto Instituciones Sin Finalidad de Lucro (ISFL), y una oferta de servicios que incluye desarrollo de proyectos I+D, cooperación nacional e internacional, asesoramiento y asistencia y difusión técnica, normalización, demostración y formación.

De los centros técnicos existentes en España 70 se encuentran adscritos a la Federación Española de Entidades de Innovación y Tecnología (FEDIT) y 61 están registrados en el Directorio de Centros de Innovación Tecnológica (CIT) del Ministerio de Ciencia y Tecnología. La mayoría se concentra en la Comunidad Valenciana (15 centros CIT gestionados por el IMPIVA, Instituto de la Pequeña y Mediana Empresa de Valencia) y en el País Vasco (14 centros CIT, coordinados en la red vasca de centros técnicos, EITE). Otros nodos de centros CIT se encuentran en Cataluña y Castilla León, con 7 centros cada una. Madrid sólo figura con 4 centros CIT en dicho catálogo. Además de los centros CIT acreditados ante la CICYT, Cataluña dispone de una veintena de laboratorios, institutos o centros universitarios integrados en la red de apoyo a la innovación. En otras Comunidades, la colaboración entre la administración autonómica y universidades ha permitido construir y dotar de equipamiento a un buen número de centros con proyectos de infraestructura FEDER. Como ya he señalado, en este aspecto destacan particularmente Castilla y León y Andalucía.

Finalmente, otro elemento a considerar en las infraestructuras I+D son los parques técnicos o científicos, que se van estableciendo como lugares de interrelación y cooperación entre ciencia, técnica y empresas, siguiendo modelos de Estados Unidos y Europa. De acuerdo con la información suministrada por la Asociación de Parques Tecnológicos de España (APTE), y otras fuentes consultadas, se han identificado 28 parques técnicos, científicos y entornos universitarios en distinto estado de maduración y cuyas principales características se resumen en la tabla correspondiente. Los parques de más solera son los del País Vasco, Boecillo (Valladolid), Valencia, Madrid y el Vallés (Barcelona), que pueden agruparse en dos tipos básicos. De una parte, los tres del País Vasco y los de Valladolid y Valencia, en los que se alojan un buen número de centros de innovación: 9 en los del País Vasco, 8 en el de Valencia, 5 en el de Valladolid. Por el contrario, los de Madrid y del Vallés carecen prácticamente de centros de innovación, si bien albergan un buen número de empresas innovadoras, muchas con I+D propio, y disponen de un rico entorno científico y técnico.

En el caso del parque técnico de Madrid, su singularidad viene dada por la presencia de grandes empresas de alto contenido en I+D, dentro del propio parque y en el vecino parque empresarial de la ciudad de Tres Cantos, que vienen a configurar conjuntamente una especie próxima a las tecnópolis, aunque con escasa interacción con las universidades; y ello pese a la proximidad de la Universidad Autónoma de Madrid. Un caso particular en este contexto es el del Parque Científico Tecnológico de Sevilla en la Cartuja, promovido por la Sociedad Estatal para rentabilizar las infraestructuras de la Expo 92 en colaboración con la Junta de Andalucía y la Universidad de Sevilla (USE). Aunque tuvo unos inicios vacilantes, el parque Cartuja 93 cuenta con un edificio para tres institutos mixtos CSIC-USE, el Centro Nacional de Aceleradores, 3 CT de la Escuela Superior de Ingeniería (USE) y 3 CIT, además de numerosas empresas.

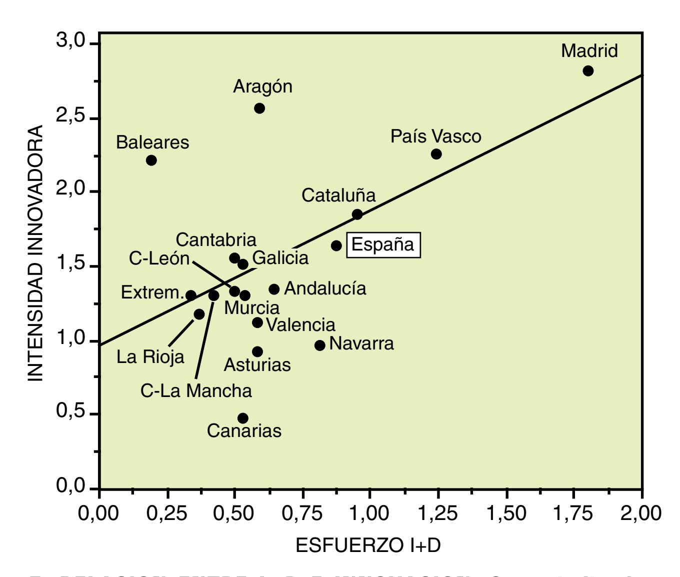
La disponibilidad de las ayudas FEDER ha propiciado la puesta en marcha de parques científicos basados en la colaboración de administraciones autonómicas y universidades, en la que se proporciona suelo urbanizado para empresas y edificios para albergar institutos o centros técnicos universitarios. Tal es el caso del Parque Científico de la Universidad de León, con 4 centros, el Parque Tecnológico de Andalucía con un edificio para alojar 6 centros I+D de la Universidad de Málaga en colaboración con la Junta de Andalucía y el Parque Científico de la Universidad de Alcalá, un proyecto patrocinado por la Comunidad de Madrid, pero que carece de entidad actualmente. El Parque Científico de Barcelona es una iniciativa de la Universidad de Barcelona (UB) y la Fundación Bosch i Gimpera que ya dispone de un gran edificio para el centro de innovación y otro que da acogida a los institutos I+D de Moléculas Bioactivas y Biotecnología de Plantas, en los que participan grupos de la Universidad Autónoma de Barcelona, el CSIC y otras entidades, incluyendo empresas del sector farmacéutico. Una iniciativa similar promovida por la Universidad de Alicante (Med-



6. PESO DE LAS DISTINTAS ENTIDADES I+D en las comunidades autónomas. La figura está compuesta con los datos más recientes disponibles sobre universidades, CPI estatales y regionales, CIT, parques técnicos y científicos y empresas que realizan I+D. (Fuentes: RedIRIS, Asociación de parques técnicos, listado CIT y base de datos de entidades que realizan I+D de la CICYT.)

Park) no acaba de encontrar vía libre, por desavenencias con las autoridades locales y autonómicas.

Junto a estos parques hay que destacar algunos entornos universitarios de alto contenido técnico o innovador, como es el caso de las universidades politécnicas de Cataluña, Valencia o Mondragón. También se han incluido en esta relación entornos de innovación, como el Campus Sanitario de la Universidad de Granada y el Campus Agroalimentario de la Universidad de Gerona.



7. RELACION ENTRE I+D E INNOVACION. Como indicador de innovación se ha tomado la intensidad innovadora (gastos en innovación/cifra de negocios) de la encuesta sobre innovación técnica en las empresas (Instituto Nacional de Estadística, 1998). Como indicador de esfuerzo en I+D se utiliza el porcentaje del PIB regional destinado a I+D (GID/PIB %), cuyo valor más reciente es el suministrado por el INE, 1996.

El énfasis actual en la innovación por parte de los responsables de la ciencia y la técnica en España, es un reflejo de la preocupación comunitaria por reforzar la competitividad de la economía europea. La idea de los sistemas nacional y regional de innovación no es nueva, y tiene sus antecedentes en las tecnópolis japonesas y los distintos modelos de cooperación surgidos sobre dicha experiencia, tales como redes de innovación y complejos de técnicas avanzadas.

Lejos del modelo lineal I+D tradicional (investigación básica aplicada y desarrollo experimental), el sistema de innovación se concibe como un circuito interactivo de los agentes tradicionales de la I+D (universidades, centros públicos de investigación, centros técnicos de empresas o asociaciones e instituciones de apoyo), relacionado bidireccionalmente con el contexto macroeconómico, infraestructuras de comunicación y las condiciones del mercado nacional e internacional. La resultante de este conjunto complejo de interacciones, comparado con acierto con un ecosistema, es la capacidad de innovación regional o nacional, cuyos resultados se miden en términos de competitividad, crecimiento y empleo (*figura 5*).

Con objeto de valorar la capacidad innovadora española hemos procedido a un recuento de los distintos agentes de la innovación (universidades, centros públicos de investigación de titularidad estatal o autonómica, centros de innovación técnica del catálogo CICYT, otros centros técnicos de diversa titularidad y empresas que realizan I+D del catálogo CICYT) cuya distribución regional se representa en la figura 6. El liderazgo de Madrid depende de la acumulación de la mayoría de los CPI de titularidad estatal (algo más del 40 % del total), lo que obedece exclusivamente a razones políticas.

En el otro extremo cabría situar al País Vasco, cuya posición depende del peso conjunto de las entidades de innovación empresarial (CIT, PT y empresas I+D), muy superior proporcionalmente al peso de las entidades clásicas de investigación de titularidad pública (universidades y CPI). Desde el punto de vista geográfico, el mapa de la innovación española (*figura 1*) muestra la existencia de nodos importantes de innovación en Madrid, Barcelona, País Vasco con Navarra y la Comunidad Valenciana (con redes importantes en Valencia y Alicante).

Los datos resumidos en las figuras 1 y 6 dan una idea de la capacidad innovadora regional desde el punto de vista de los agentes o entidades implicados, pero nada dice acerca de su operatividad o eficacia. Una aproximación más directa a esta importante cuestión viene dada por el indicador de intensidad de innovación, que elabora el INE sobre la base de las encuestas sobre la innovación técnica en las empresas, que se vienen realizando desde 1996. Este indicador, que representa los gastos de innovación de las empresas en porcentaje de su cifra de negocios, se considera como un buen barómetro de la innovación para fines comparativos de los sistemas de innovación regional y nacional.

Para los objetivos de este estudio, nos ha parecido interesante comparar (*figura 7*) la intensidad de in-

novación de las empresas con el indicador de esfuerzo en I+D (GID/PIB %). En general, se aprecia la existencia de una relación lineal entre el indicador de esfuerzo y el de innovación intensidad con dos notables excepciones. De una parte, Baleares y Aragón presentan una alta intensidad innovadora en un entorno I+D relativamente bajo (*figuras 1 y 6*). Por otra parte, Asturias, Navarra y Canarias presentan una baja intensidad innovadora, que no guarda relación con su esfuerzo I+D. Si se exceptúan estas 5 comunidades autónomas, el resto presenta una correlación innovación/I+D altamente significativa, que es conforme al modelo de sistema regional de innovación. No obstante, a la hora de valorar estas correlaciones debe tenerse en cuenta que buena parte de las empresas innovadoras no realizan I+D y que una notable proporción de los gastos de innovación de las empresas de tamaño mediano y pequeño se destinan a la adquisición de maquinaria, antes que a la creación o mejora de productos.

De los datos presentados en las figuras 1, 6 y 7 se desprende que los tres núcleos consolidados de innovación existentes en España responden a distintas tipologías. En Cataluña, la gestión autonómica de la ciencia y la técnica ha favorecido la creación de redes temáticas y de apoyo a la innovación, utilizando recursos universitarios preexistentes; de forma que la innovación regional tiene un marcado apoyo científico. La tipología de la innovación en Madrid viene determinada por el peso histórico de la capitalidad de la nación, que ha conducido a una acumulación de centros públicos de investigación y a la domiciliación social de grandes empresas y de sus centros de I+D; de ahí la escasez de entidades intermedias de innovación. Por el contrario, en el País Vasco, la tradición industrial ha llevado a un desarrollo de la innovación basado en parques y centros de investigación técnica que no tiene parangón en el resto de España, con la excepción de la Comunidad Valenciana, que se aproxima al modelo vasco en este aspecto. Hay que señalar además, que la importante presencia empresarial en el GID del País Vasco —más del 70 %, equivalente al de Estados Unidos y las regiones de mayor desarrollo técnico europeas— sugiere que el desarrollo de la innovación está basado en el tirón (*push*) empresarial antes que la incentivación y empuje (*pull*) administrativo.

En otras regiones, la acumulación de acciones de estimulación y promoción por parte de las administraciones autonómicas permite identificar sistemas emergentes de innovación. Tal es el caso de la Comunidad Valenciana (con dos polos de desarrollo en Valencia y Alicante), Castilla y León (en la que Valladolid y León aparecen como focos destacados), Andalucía (en el eje Sevilla-Málaga) y Galicia (en el entorno de Vigo-Orense).

En resumen, el proceso de institucionalización de la ciencia en España en los últimos 25 años ha evolucionado desde una inicial preocupación por la promoción y estímulo de la investigación básica en universidades y CSIC hasta la predilección actual por los procesos de innovación empresarial. Simultáneamente se han ido desarrollando las infraestructuras I+D autonómicas, en las que hoy día es posible percibir nodos de innovación en distinto grado de maduración. Aunque está por ver cuál sea la resultante final de las distintas iniciativas señaladas a lo largo de este escrito, sería deseable que el énfasis en la innovación empresarial del presente no comprometiera el futuro de la investigación básica, principio de todo conocimiento.

Bibliografía complementaria

EL SISTEMA ESPAÑOL DE CIENCIA Y TÉCNICA. A. Pestaña, en *Investigación y Ciencia*, n.º 243, págs. 6-13; diciembre 1996.

REGIONAL INNOVATION SYSTEMS. Dirigido por H. J. Braczyk, P. Cooke y S. Heinderech. University College (UCL Press), Londres, 1998.

Información sobre infraestructuras I+D e innovación en los webs de APTE (www.apte.org), FEDIT (www.fedit.es), RedIRIS (www.rediris.es), SAIOPI (www.csic.es/saiopi).

Dr. Coppelius

A modo de despedida

"Pura casualidad." Así describía en 1932 las razones a las que se debió la creación de *The Amateur Scientist*, clásica sección fija de *Scientific American* y puede que la más longeva de cuantas lo componen, su iniciador, Albert G. Ingalls. Atribuyamos también a los azares del destino el que haya dejado de publicarse allí desde marzo del presente año, por lo que consecuentemente ha llegado el momento de clausurar ésta su homóloga de *Investigación y Ciencia*. A los seguidores devotos de esta parte de nuestra publicación probablemente no les incomode la pequeña síntesis histórico-filosófica que a continuación se hace para dejar constancia del evento.

Ingalls, que era subdirector de ediciones de *Scientific American* por aquella época, era astrónomo y aficionado a la astronomía. Mientras hojeaba unas revistas en una biblioteca descubrió casualmente unos artículos de R. W. Porter en los que se explicaban las experiencias de su autor en la construcción de espejos para montar telescopios baratos. Tras poner en práctica esas enseñanzas y construir su primer telescopio, Ingalls nos cuenta que "entonces fue tomando cuerpo una idea más ambiciosa. ¿Por qué no intentar popularizar ampliamente la construcción de telescopios por parte de los aficionados con la ayuda de Ellison, de Porter y la disponibilidad de *Scientific American* como medio para acceder a gran número de personas con intereses científicos? ¿Le interesaría a la gente? Nadie lo sabía. Para explorar el interés que para el lector pudiera tener el tema, si es que tenía alguno, se publicó un artículo en noviembre de 1925, contando lo sucedido en una noche de observación astronómica pasada con un grupo que había aglutinado Porter". La respuesta de los lectores fue rápida. Trescientos ochenta y seis de ellos pidieron que se publicasen instrucciones para la construcción de telescopios como los que se mencionaban.

Y así empezó una serie ininterrumpida de contribuciones de la más variada índole y autoría que se incluyeron en todos los números de *Scientific American* a partir de 1926, con éxito continuado, si bien siempre relativas a temas directa o indirectamente relacionados con la construcción de telescopios, actividad que provocó el "entusiasmo creciente y a veces casi fanático de un porcentaje cada vez mayor de los lectores de *Scientific American*". Estos materiales se publicaron pronto en forma de libro bajo el título de *Amateur Telescope Making* (generalmente conocido como ATM), obra que llegó a contar con 1800 páginas distribuidas en tres volúmenes y que se siguió reimprimiendo hasta 1974 por lo menos, constituyendo un verdadero filón de datos sobre temas ópticos, mecánicos y astronómicos, aunque organizados un tanto caóticamente.

La sección fue conociendo diversas designaciones a lo largo de los años posteriores, llamándose sucesivamente "The Back Yard Astronomer", "The Amateur Astronomer", "The Amateur Telescope Maker" y "Telescoptics".

Después de la Segunda Guerra Mundial *Scientific American* experimentó una profunda transformación, obra de la iniciativa empresarial y los talentos editoriales del triunvirato formado por Gerard Piel, Dennis Flanagan y Donald H. Miller, como resultado de la cual se publicó en mayo de 1948 el primer número de la revista que todos hemos considerado siempre como *Scientific American* sin más.

En abril de 1952 se inició la apertura de la sección a temas distintos de la construcción de telescopios, a cargo todavía de Ingalls y con el encabezamiento definitivo de "The Amateur Scientist". Se ocupó de la descripción de un sismómetro. Los temas astronómicos siguieron teniendo una cierta preponderancia, que fue disminuyendo con el tiempo. Ingalls falleció en 1954.

En mayo de 1955 se hizo cargo de la sección Claire L. Stong y con él empezó lo que puede considerarse el período clásico. La amplitud de miras, la precisión de las descripciones y de la información facilitada, la seriedad de las indicaciones teóricas, la claridad de las ilustraciones fueron todos factores esenciales de su continuado interés, mantenido mensualmente a lo largo de más de veinte años. Stong falleció el 9 de diciembre de 1975 a los 73 años de edad. Su última colaboración se publicó en el número de febrero de 1976 de *Scientific American*, donde también se insertó una breve nota necrológica (p. 128). "Stong fue el investigador aficionado en persona. Le encantaba todo lo relacionado con la matemática aplicada, la física y los aparatos eléctricos, ópticos y mecánicos. Tenía una especial habilidad para estos últimos, hasta el punto de que construyó y probó por sí mismo prácticamente todos los descritos en *The Amateur Scientist*, ya fuesen o no idea suya en un principio. Podía estarse seguro de que todo lo que se describía en la sección funcionaba porque él mismo lo había construido."

Scientific American no publicaba, pues, *The Amateur Scientist* cuando apareció el primer número de *Investigación y Ciencia*, hace ahora exactamente veinticinco años. Esto fue motivo de seria inquietud para los promotores intelectuales de la revista, que consideraban este apartado como definitorio de las esencias que se intentaba reproducir: curiosidad intelectual, versatilidad, facilitación máxima para el no iniciado, un nivel importante de exigencia para todos los implicados, ya fuese en calidad de autores, de editores o de lectores. Por ello, y a sabiendas del propósito de la dirección de *Scientific American* de reiniciarla tan pronto como se encontrase un titular adecuado, se tomó la decisión de crear lo que desde entonces se ha llamado *Taller y laboratorio*, utilizando como material una antología de trabajos de Stong, sacados de la que él mismo pu-

blicara en forma de libro (*The Scientific American Book of Projects for the Amateur Scientist*. Simon and Schuster. Nueva York, 1960), del que se hicieron hasta nueve reimpresiones en años posteriores. Stong publicó otro libro sobre trabajo del vidrio, muy útil para los aficionados y muy indicativo de su talante (J. E. Hammesfahr y C. L. Stong: *Creative glass blowing*. Freeman. San Francisco, 1968).

La sección no encontró, en cambio, el mismo favor en el resto de las ediciones europeas de *Scientific American* (italiana, francesa, alemana), ninguna de las cuales la ha publicado nunca. La causa de tal desinterés quizá sea la rareza a este lado del Atlántico del mítico sótano doméstico, o del no menos afamado garaje, escenarios de tantas gestas intelectuales y hasta empresariales en el medio norteamericano, cuyas viviendas parecen disponer siempre de ellos. Una objeción que se ha planteado con frecuencia era lo complicado de los proyectos, pasando por alto no sólo la abundancia de propuestas muy sencillas sino sobre todo el valor explicativo que sus páginas han tenido. Aunque no se las considerase más que como "prácticas de sillón", para muchas personas tiene un gran atractivo el conocer en detalle y reproducir mentalmente las realizaciones de otras más emprendedoras, más dedicadas o dotadas de los medios adecuados. Cierto es que la práctica de la investigación está cada vez más institucionalizada y más alejada de las posibilidades del individuo aislado. Véase como muestra lo que se indica en la página 36 de este mismo número sobre la realización de un experimento "profesional" en la actualidad. ¿Deberá limitarse el aficionado a la incesante repetición con variaciones de los experimentos de la ciencia del siglo XIX? La consecución de los instrumentos y de los materiales necesarios también es cada vez más problemática, así como la de la información relacionada con estas actividades o la posibilidad de recabar la ayuda de artesanos en activo, especie prácticamente extinta. La realidad y la accesibilidad generalizada de Internet constituyen quizás el único factor favorable en este panorama, al permitir obtener determinados suministros, libros o relaciones con otros aficionados de forma sencilla cualquiera que sea la ubicación sobre el planeta. El ingenio y la perseverancia individuales tienen que poner el resto.

En julio de 1977 se reanudó la publicación de *The Amateur Scientist* en *Scientific American*, esta vez bajo el liderazgo de Jearl Walker, cuyas contribuciones fueron fielmente reproducidas en *Investigación y Ciencia*. Walker era profesor de física y experto divulgador científico, habiendo publicado un libro de éxito titulado *The Flying Circus of Physics* (Wiley. Nueva York, 1977). El enfoque de Walker fue más conceptual y teórico que constructivo, aunque sus propuestas también tuviesen un enorme interés. La última de ellas, que se publicó en junio de 1990, parecía pensada para contradecir las afirmaciones anteriores, pues se trata de la construcción de un láser casero, una empresa peliaguda sobre la que ya Stong había echado anteriormente su cuarto a espadas en varias ocasiones.

Taller y laboratorio no apareció en el número de mayo de 1990, anunciando un prolongado período de turbulencias para la sección, que pasó primero a bimensual, alternando con otra de nueva creación llamada *Juegos de ordenador*, y que se publicó luego de manera irregular y a cargo de muy diversos autores entre los finales de 1990 y 1995.

En enero de 1996 volvió a ser mensual, si bien se la constriñó al excesivamente reducido espacio de un par de páginas, bajo la responsabilidad de Shawn Carlson. Aun así recuperó mucho de su pasado esplendor, ofreciendo proyectos nuevos e interesantes, al tiempo que presentaba versiones actualizadas de algunos clásicos. Carlson es el creador y *factotum* de la *Society for Amateur Scientists* (SAS), de la que nuestros lectores ya tienen noticia y que constituye ahora el refugio al que pueden acudir los interesados en estos temas (www.sas.org).

Mención especial merecen las contribuciones de toda una serie de ilustradores que desde el comienzo aportaron un elemento esencial y no menos definitorio que el propio texto. Russell W. Porter, Roger Hayward, Jerome Kuhl o Michael Goodman son representantes egregios de esta serie. El grado de implicación de los dos primeros lo pone de manifiesto el hecho de que también fueran quienes idearon los proyectos presentados en muchas ocasiones. Y permítasenos aprovechar este contexto para agradecer su valiosa colaboración a José Vilardell, el perseverante y eficaz traductor de la mayoría de las entregas de *Taller y laboratorio* durante todos estos años.

¿Qué nos queda? Aparte de todo lo publicado en los trescientos números de *Investigación y Ciencia*, puede acudirse a los libros y recursos mencionados. Otra fuente adicional de mucho interés es la edición completa en disco compacto y en inglés de todas las entregas publicadas por *Scientific American* desde mayo de 1928 hasta noviembre de 1999, siendo de esperar que futuras reediciones incluyan también las piezas de los años 2000 y 2001. Puede obtenerse a través de la SAS.

Como culminación de esta larguísima y gozosa fiesta, a la que los lectores de *Investigación y Ciencia* han estado invitados durante el último cuarto de siglo, pero que, ¡qué le vamos a hacer!, ya ha llegado a su fin, nos ha parecido lo mejor ceder de nuevo la batuta al venerable Stong y ofrecer, sin apenas retoques y a modo de fin de fiesta, uno de sus más característicos, interesantes y barrocos proyectos, publicado ya hacia el final de su vida, en febrero de 1974. Y como tributo simbólico a toda la serie de grandes ilustradores hemos conservado la caligrafía de Jerome Kuhl, dejando sin traducir los rotulados. Sirva como comprobación de las simultáneas grandeza y miseria subyacentes a la condición de investigador aficionado que en la página 10 de este número se recuerde a nuestros fieles la futilidad de este experimento, puesto que desde octubre de 1983 la velocidad de la luz es una constante internacionalmente definida y, por lo tanto, para lo más que podría servir su realización sería para la calibración de la regla con la que el intrépido explorador hubiese tomado las medidas. Pero en ningún otro sitio se encontrará tal acopio de ideas, de ingenio y de conocimiento detallado que ayuden a entender, a maravillarse y a gozar con la resolución de un problema y con el dominio de un concepto que han sido decisivos en la historia intelectual de la humanidad.

Taller y laboratorio

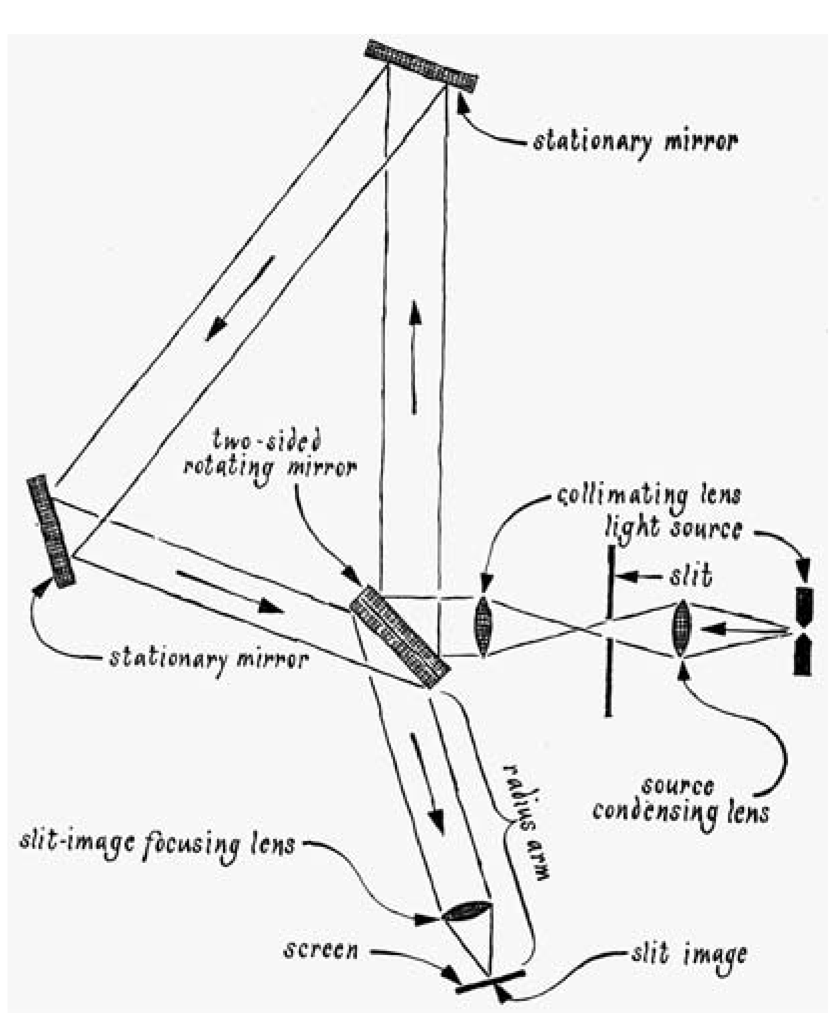
C. L. Stong

Un aficionado realiza una versión del aparato de A. A. Michelson para la medición de la velocidad de la luz

El físico francés Jean Bernard Léon Foucault hizo una medición aproximada de la velocidad de la luz en 1862. Su determinación, que los aficionados pueden reproducir fácilmente, se realizó con un aparato que constaba esencialmente de cuatro partes. Un espejo que giraba a una velocidad conocida reflejaba un rayo de luz procedente de una hendidura hacia otro espejo fijo situado a una distancia conocida del espejo rotatorio. El espejo fijo volvía a reflejar la luz hacia el rotatorio. Mientras la luz realizaba este recorrido el espejo rotatorio había girado un poco. Foucault calculó el ángulo observando el desplazamiento de la imagen reflejada de la hendidura mediante un ocular. Para determinar la velocidad dividió la distancia por el tiempo requerido para que el espejo girase el ángulo observado. La velocidad así calculada resultó ser de 298 000 km por segundo.

El físico americano A. A. Michelson realizó posteriormente una versión muy refinada de ese instrumento, con la que obtuvo una velocidad de 299 769 km en 1926, cercana al valor actualmente aceptado de 299 792,5 km por segundo. Este tipo de experimento ha fascinado siempre a Sam Epstein, un químico de California, quien el año pasado construyó una versión casera del instrumento de Michelson, fundamentalmente para ver hasta dónde podía acercarse a sus resultados. Así es como describe sus afanes.

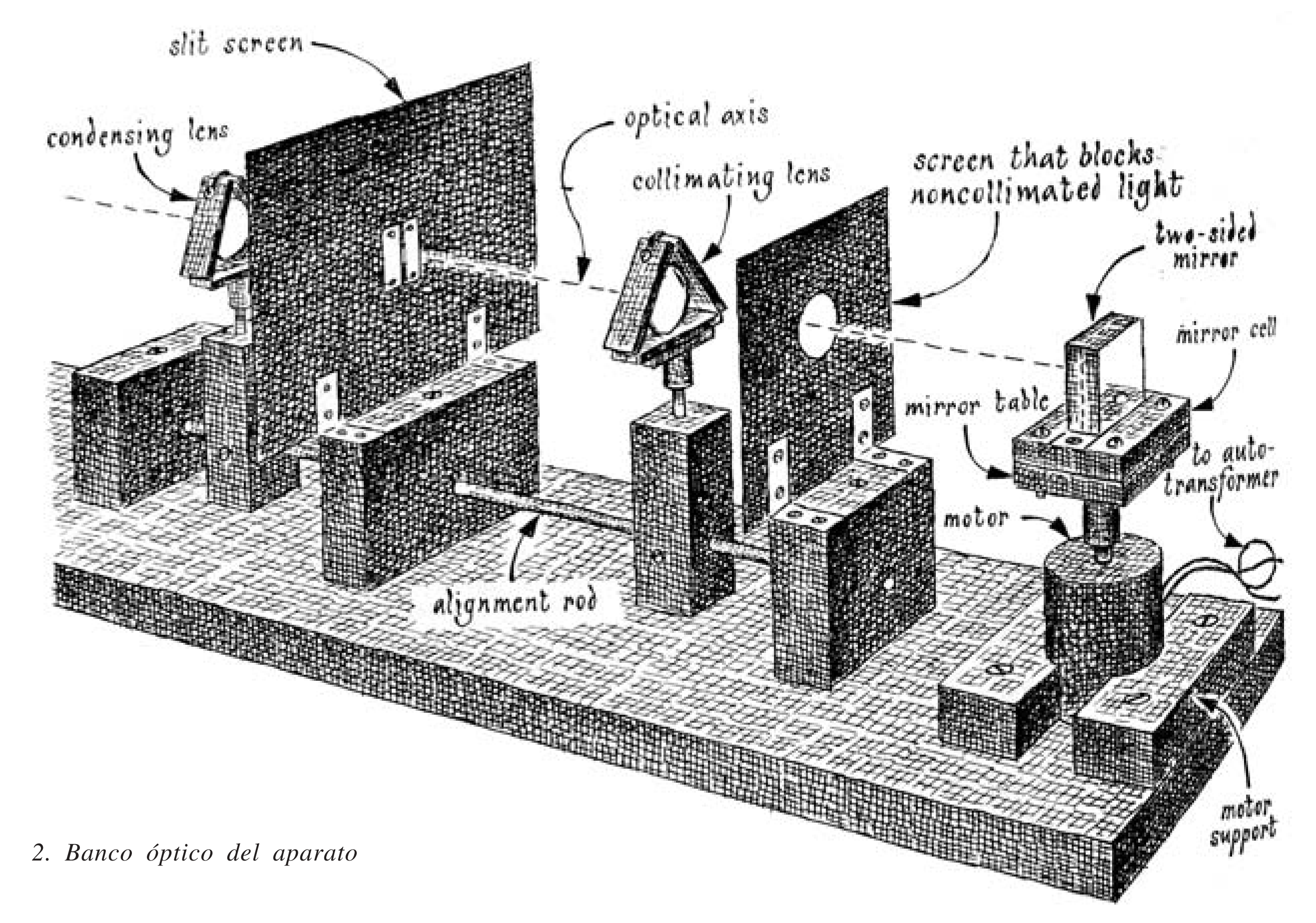
No se trataba de duplicar el experimento de Michelson, que se realizó sobre una distancia de 3,5 km, mientras que yo no disponía más que de unos 600 m. Puede realizarse el experimento en distancias menores, plegando repetidamente el rayo luminoso mediante espejos fijos hasta que la longitud total del trayecto sean unos 600 m, pero esto se consigue a costa de la intensidad de la imagen de la rendija, que disminuye con cada reflexión. También se puede trabajar con distancias más cortas si se hace girar el espejo a mayor velocidad que las 7200 revoluciones por minuto utilizadas por mí. La longitud total del trayecto triangular entre las dos superficies reflectantes de mi espejo rotatorio (vía los espejos fijos) fue de 1,131 km. La distancia entre la pantalla translúcida sobre la que aparece la imagen de la rendija y el espejo rotatorio fue de 18,57 m, trayecto que yo designo como el brazo radial.



1. Trayectoria seguida por el rayo de luz

Esta combinación concreta de distancia operativa, velocidad del espejo y brazo radial dio como resultado un desplazamiento observado de la imagen de la rendija de más de 10 cm con respecto a la posición que tenía cuando el espejo estaba parado. La exactitud de la medición de este desplazamiento fue de 0,01 cm, de modo que pude determinar la velocidad de la luz dentro de un 0,1 por ciento del valor aceptado.

La luz reflejada por el espejo rotatorio no incide en los espejos fijos más que durante muy cortos instantes, llegando a la pantalla como una serie de breves destellos que portan una pequeña parte de la luz transmitida por la rendija. Aunque el bien conocido efecto que es la persistencia de la visión haga que el observador vea una imagen con-



2. Banco óptico del aparato

tinua de la rendija, es una imagen bastante débil, razón por la que ha de usarse una luz muy intensa. Mi fuente luminosa es un arco eléctrico que salta entre electrodos de grafito del tipo utilizado en los proyectores cinematográficos.

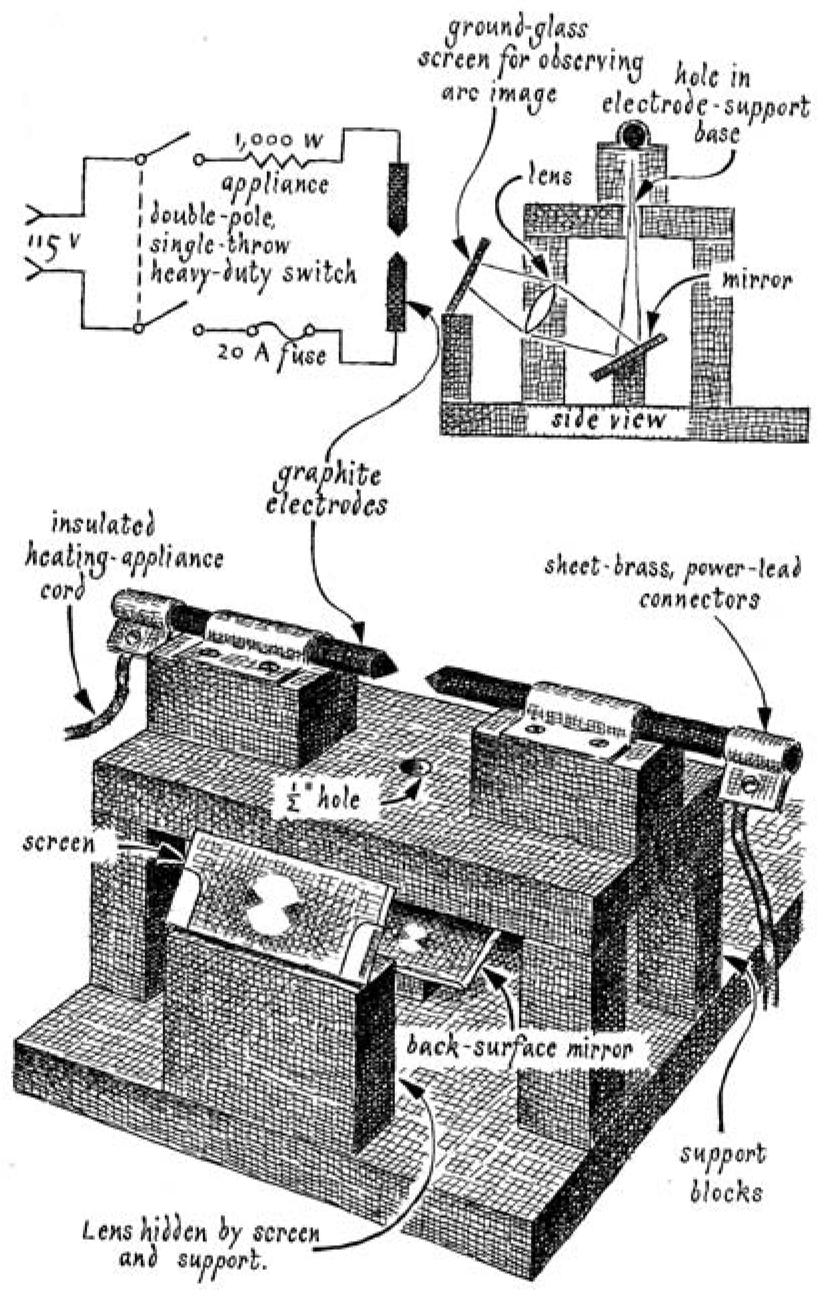
Hay que conectar en serie con el arco y a modo de regulador algún aparato doméstico de unos 1000 W, como una tostadora o una plancha, para que limite la corriente a unos 10 A. Puede hacerse que la luz sea más intensa insertando en el circuito un rectificador de onda completa hecho con diodos de silicio de potencia, que admitan más de 10 A y más de 200 V de tensión inversa. Todas las conexiones eléctricas tienen que ser robustas para evitar arcos secundarios.

Puede iniciarse el arco haciendo que los carbones se toquen un instante y separándolos a continuación. Otra posibilidad es colocarlos casi en contacto y rozarlos a ambos a la vez con un tercer electrodo. Para no recibir descargas hay que situarse sobre una superficie seca y aislante, como una esterilla de goma, usar guantes de cuero secos y ajustar cada electrodo por separado.

La lámpara de arco se construye en su mayoría con Transite, un tablero de asbesto disponible en los mayoristas de maderas. Sus partes activas han de cubrirse con una cubierta de Transite para confinar la luz, cubierta que estará dotada de una chimenea de ventilación, si bien los extremos de los electrodos tienen que resultar accesibles desde el exterior para que se les pueda empujar hacia adentro de vez en cuando, conforme el grafito se va consumiendo en el arco. La longitud del arco puede vigilarse continuamente si se enfoca una imagen reflejada de las ardientes puntas de los electrodos sobre una pequeña pantalla de observación situada fuera de la cubierta (*véase la ilustración* 3). Nunca debe mirarse directamente a un arco de carbón sin utilizar una protección del tipo de las viseras de soldador. La experiencia me demostró que la separación óptima de las puntas de los electrodos era de unos cinco milímetros.

El condensador y la hendidura deben disponerse de manera que la imagen de las puntas al rojo se forme pasada la hendidura. La luz del arco ha de atravesar la rendija, pero no la que provenga de los electrodos al rojo. La lente condensadora ha de estar lo suficientemente lejos del arco como para no calentarse excesivamente.

Hay que ajustar la distancia entre la hendidura y la lente colimadora de modo que sea exactamente igual que la distancia focal de ésta. Su diámetro habrá de ser lo suficientemente grande para interceptar los rayos procedentes de la totalidad de la rendija. La luz procedente de sus extremos y que desborda la lente colimadora se intercepta mediante una pantalla dotada de una abertura cuyo diámetro es igual al de la lente (*véase la ilustración* 2). En mi aparato se utilizan lupas ordinarias de 5 cm de diámetro y de unos 15 cm de distancia focal como lentes condensadora y colimadora. Todos los componentes del banco óptico han de estar sólidamente montados, teniendo también que estar centrados sobre el eje óptico del sistema.



3. Detalles de la lámpara de arco

El espejo rotatorio está formado por dos espejos aluminizados en su cara frontal de 6 mm de espesor y pegados con epoxia. Sólo tienen que ser ligeramente mayores que el rayo colimado que han de interceptar. Este espejo está sujeto por una celda rígidamente fijada mediante un adaptador al eje del motor. La mía se hizo con madera y tiras metálicas. Se colocó un acolchado de espuma para recibir las superficies reflectantes y los bordes del espejo.

Los espejos fijos se colocan sobre soportes de madera, pudiendo girárseles en los ejes horizontal y vertical. Salvo que el primero de ellos se encuentre exactamente a la misma altura que el rotatorio, lo que es muy improbable si se tiene en cuenta la distancia que los separa, habrá que insertar en el tren óptico otro espejo auxiliar y ajustable que dirija el haz luminoso del espejo rotatorio hacia su destino.

La base del primero de mis dos espejos auxiliares aloja también un fototubo de vacío. Su cátodo recibe dos destellos de luz a cada vuelta del espejo bifronte. Los pulsos de corriente eléctrica resultantes se utilizan para medir la velocidad de giro del espejo.

Para hacer girar el espejo se utiliza el motor regulable de una máquina de coser. El mío es un motor Dayton de un quinto de caballo. Opera con la corriente alterna de 115 V, consumiendo un máximo de 2,4 A a 10 000 revoluciones por minuto, y viene acompañado de un regulador especial. Pero de este modo no se logra ajustar su velocidad con la precisión requerida por el experimento, por lo que lo hago funcionar inicialmente a 8000 revoluciones y lo alimento con un autotransformador variable, cuya salida se reduce hasta que se obtienen exactamente las 7200 revoluciones por minuto.

Son varios los métodos que pueden idearse para medir la velocidad a que gira el espejo. El fototubo genera dos pulsos de corriente continua por revolución, pulsos que pueden amplificarse para que hagan destellar al mismo ritmo a una pequeña lámpara de neón. Mediante un oscilador gobernado por un cristal de cuarzo se puede hacer que otra lámpara de neón cercana produzca 7200 destellos por minuto. El efecto estroboscópico resultante indicaría la sincronización entre ambas.

También puede conectarse la salida del fototubo a las placas verticales de un osciloscopio de rayos catódicos, cuyas placas horizontales sean activadas por una frecuencia fija de digamos 60 Hz. La aparición de dos picos estacionarios en la pantalla del aparato indicaría que el espejo está girando a 7200 revoluciones por minuto. Esta es la manera de saber la velocidad que yo utilizo, por la sencilla razón de que dispongo de un osciloscopio.

La salida del fototubo se presenta como un pulso de tensión en los extremos de una resistencia de 27 kΩ (*véase la ilustración* 5) y alimenta las placas verticales del osciloscopio por mediación de un interruptor de dos circuitos y dos posiciones. La otra mitad del interruptor sirve para aplicar los 60 Hz de la red de alumbrado estadounidense a las placas, lo que permite comprobar la frecuencia de barrido de las placas horizontales del instrumento. La frecuencia de red puede tomarse de cualquier punto de baja tensión del circuito, como pudiera ser el secundario del transformador que alimenta los filamentos.

Si la pantalla que recibe la imagen de la hendidura está a la misma altura que el espejo rotatorio y la propia hendidura, el espejo le enviará sucesivamente la imagen directa de la rendija brillantemente iluminada y su relativamente tenue imagen reflejada por los espejos fijos, con lo que ésta resultará anegada por el resplandor de aquélla. Yo lo he evitado ajustando el segundo espejo fijo de manera que la imagen de la rendija se refleje un poco hacia abajo por el lado posterior del espejo rotatorio hacia un segundo espejo auxiliar situado sobre la plataforma de observación, espejo que a su vez la refleja hacia arriba a través de una lente acromática. Esta lente enfoca la imagen de la rendija sobre una pantalla translúcida, donde se la puede observar cómodamente fuera del plano de la imagen directa.

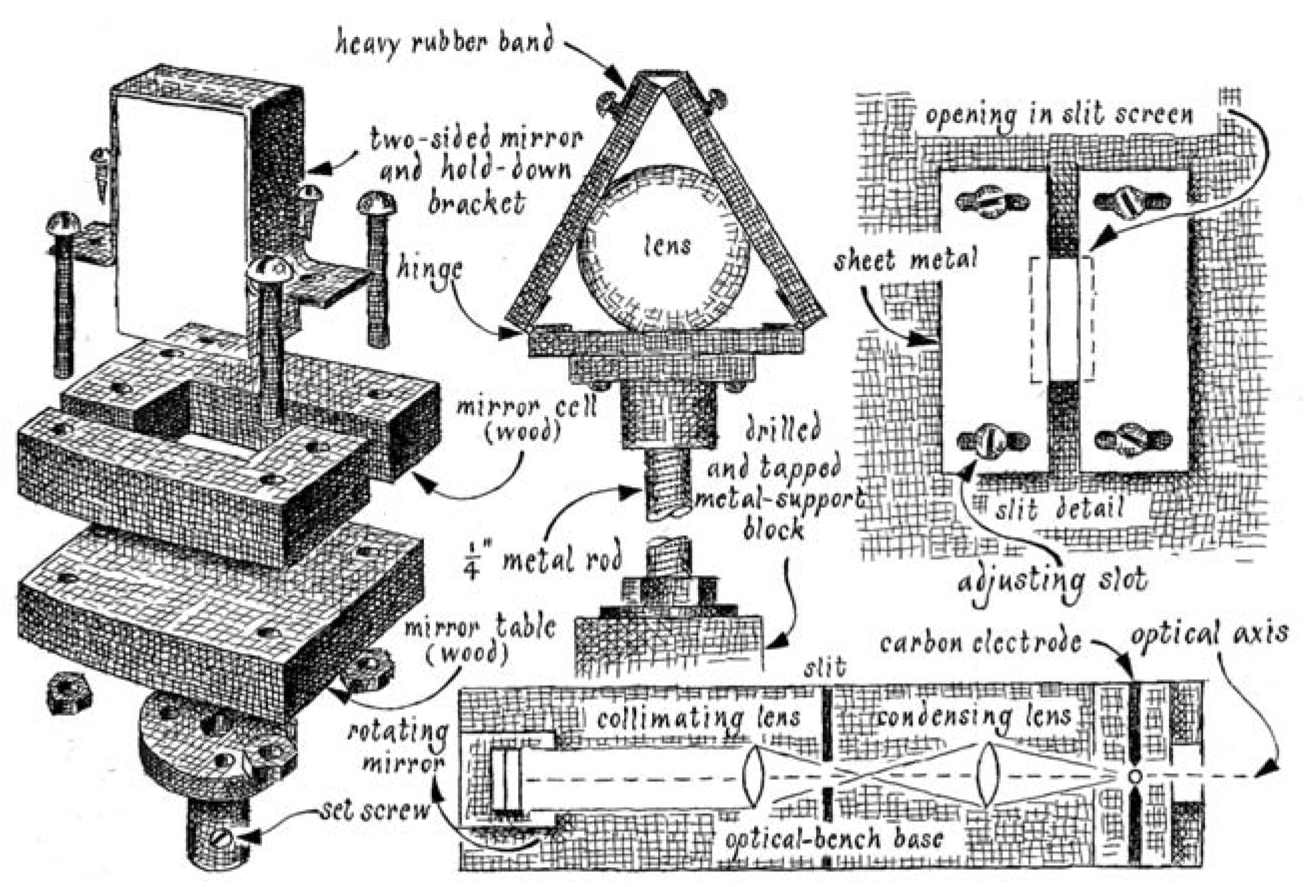
La lente acromática y un indicador hecho con lámina metálica están montados sobre un carro movido por un tornillo, que puede desplazarse lateralmente unos 15 cm en relación al haz luminoso (*véase la ilustración* 6). El indicador atraviesa la pantalla y dispone de un pequeño agujero por el que puede observarse la imagen de la rendija. Luego se dobla, de modo que cubra un pequeño saliente o mesa en el que se registra la posición de la imagen por las indicaciones de su punta.

En la base de este conjunto se dispone de unos huecos acanalados que permiten su ajuste lateral respecto al haz. El tornillo que mueve el carro se hizo con varilla roscada de la que venden en las ferreterías, así como las varillas lisas que le sirven de guía. El resto está hecho con madera y tornillos corrientes.

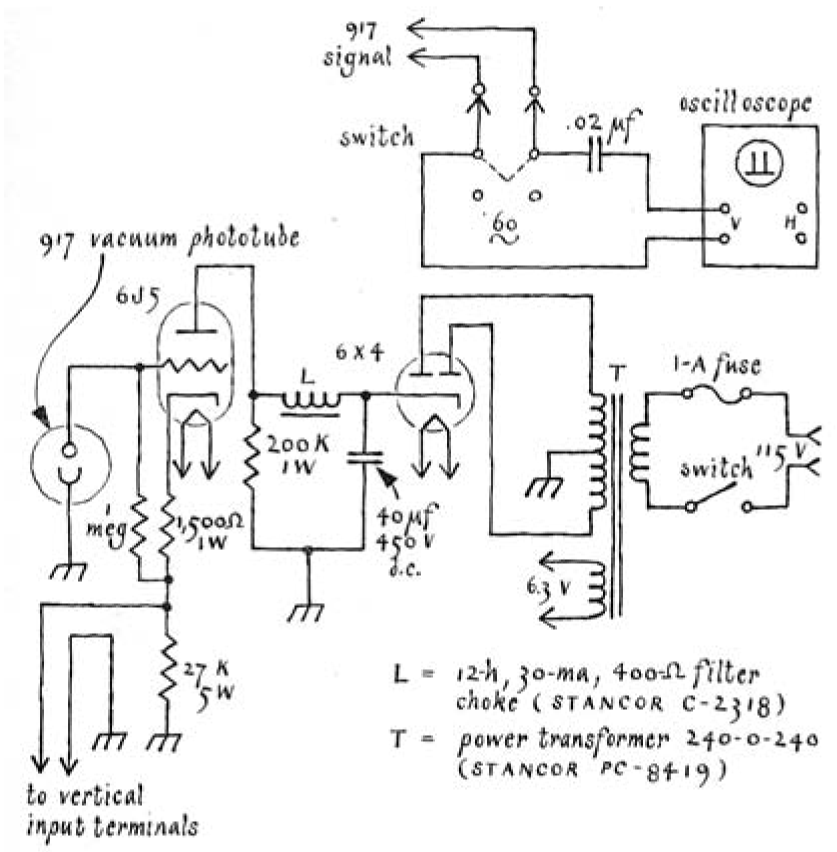
Una vez montado el aparato hay que ajustarlo de noche, que es también cuando naturalmente se hacen los experimentos, requiriéndose al menos dos ayudantes para el ajuste y la operación del sistema. Los integrantes del grupo pueden comunicar entre sí por medio de un código preestablecido de señales luminosas hechas con linternas o por alguno de los variados tipos de radioteléfono disponibles.

Los espejos estacionarios tienen que estar instalados sobre soportes sólidos. Y hay que medir la longitud del trayecto comprendido entre la primera y la segunda caras del espejo rotatorio a través de todos los espejos fijos con toda la precisión posible; lo mejor es utilizar un teodolito de cartógrafo. La forma de usarlo se explica en cualquier tratado de agrimensura. El error máximo de la medición deberían ser 30 cm. La pantalla de observación ha de colocarse por lo menos a 18 m del espejo rotatorio.

Se sitúa la lente condensadora en una posición tal que la rendija quede cubierta por la imagen del arco, mientras que las imágenes de las puntas de los electrodos caen sobre la pantalla por fuera de los bordes de la hendidura. La anchura de ésta para las pruebas iniciales puede ser como de unos tres milímetros. Se coloca entonces la lente colimadora a una distancia de la rendija algo superior a su distancia focal; tiene que estar alineada con el espejo rotatorio.



4. Detalles del banco óptico



5. Circuito del osciloscopio

En el centro de una cartulina blanca de 15 cm cuadrados se dibuja una circunferencia cuyo diámetro sea el de la lente colimadora. Se enciende el arco y se coloca el espejo rotatorio en una posición tal que refleje la luz en una dirección conveniente. Se hace entonces que un ayudante interponga la cartulina en el rayo colimado como a un metro del espejo, momento en el que el diámetro de la mancha luminosa tiene que igualar al del círculo dibujado. Si no lo hace, se mueve la lente colimadora acercándola o alejándola de la rendija hasta conseguir la coincidencia.

Un segundo ayudante ha de supervisar mientras tanto la lámpara de arco, ajustando los electrodos como se requiera para mantener el tamaño del arco. El primer ayudante se retira entonces a una distancia como de 10 m del espejo y vuelve a comprobar el diámetro del haz para ver si la lente colimadora requiere ulteriores ajustes. La colimación es adecuada cuando el diámetro del haz luminoso no varíe en una distancia de 20 m.

Preparé unas cubiertas para proteger a los espejos fijos del polvo, cubiertas que no hay que quitar hasta que la temperatura se estabilice al anochecer para evitar la formación de rocío sobre ellos. No debería intentarse la realización del experimento más que con buen tiempo y con poco o nada de viento.

Se ajustan ahora el espejo rotatorio y el primer espejo auxiliar de modo que reflejen el haz hacia el primer espejo fijo, donde uno de los ayudantes lo observa, situando el espejo de manera que lo intercepte, momento en que se asegura el espejo rotatorio para que no pueda girarse, pues el más mínimo movimiento desviaría el haz de su diana. También se ajustan cuidadosamente los tornillos de fijación del espejo auxiliar. Por lo que se refiere al primer espejo fijo, lo único que hay que ajustar en esta fase son los tornillos que determinan su desplazamiento horizontal. Se alinea luego el segundo espejo fijo con el primero, apretando los tornillos que impiden el giro vertical y horizontal del primer espejo y el movimiento horizontal del segundo.

Ahora hay que alinear el segundo espejo fijo con la cara opuesta del espejo rotatorio. Una vez que se haya ajustado el segundo espejo auxiliar situado en la plataforma de observación de modo que refleje el haz a través de la lente de enfoque, debería verse la rendija en la pantalla de observación. Se ajusta la anchura de la rendija del banco óptico hasta obtener la mejor calidad de imagen posible y se traza una fina línea sobre el tablero de registro para indicar la posición cero de la imagen. Se libera el espejo rotatorio y se dirige la luz hacia el alojamiento del fototubo, que se orienta de tal manera que el haz incida directamente sobre el cátodo del tubo.

También se necesitan tres personas para la operación del aparato. Una de ellas observa la forma de onda del osciloscopio y ajusta el autotransformador de modo que la velocidad del motor se mantenga exactamente en 7200 revoluciones por minuto. Otra regula la distancia entre los electrodos del arco para que la iluminación de la rendija sea uniforme. Y la tercera mantiene alineado el indicador con la imagen y mide su desplazamiento desde la posición cero.

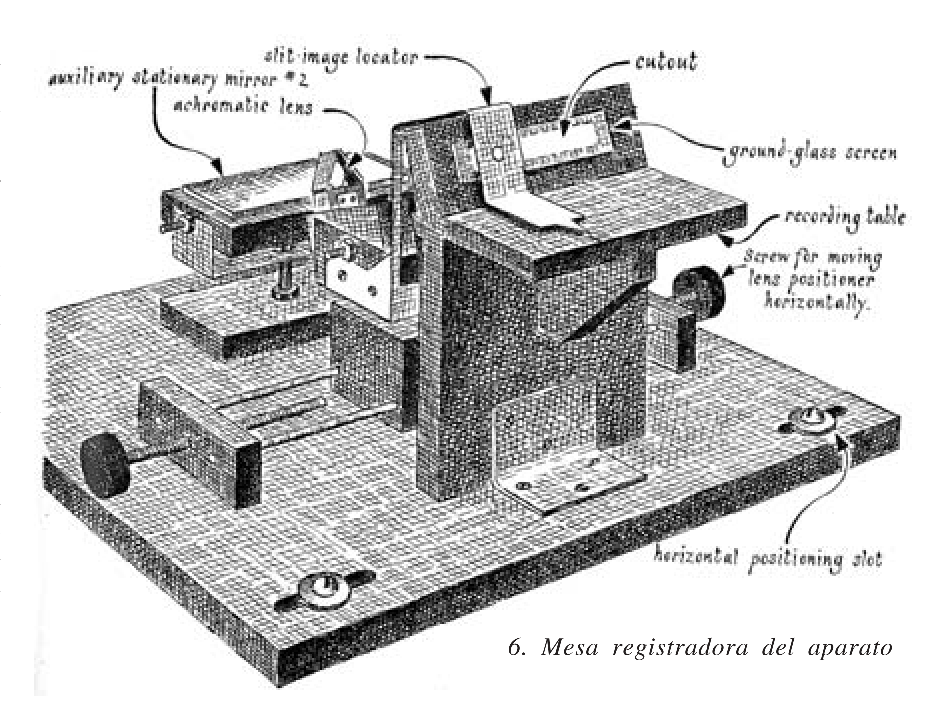
Se enciende el aparato y se deja que se caliente. Se oprime el interruptor para mostrar la onda de 60 Hz de la red de alumbrado, ajustando la velocidad de barrido del osciloscopio hasta que se vea exactamente un ciclo sinusoidal completo. Se coloca entonces el interruptor en su otra posición y se ajusta el autotransformador hasta que el osciloscopio muestre dos picos aguzados. Si la amplitud supera los límites de la pantalla o hay cualquier otra distorsión de la onda, se ajustan experimentalmente la anchura de la ventana del fototubo y los mandos del osciloscopio hasta que se vean dos agujas claras. Entonces se para el motor y se vuelve a comprobar la posición cero de la imagen de la rendija, ajustando a mano el espejo rotatorio.

Se pone en marcha de nuevo el motor y se aumenta poco a poco su velocidad por medio del autotransformador hasta alcanzar las 7200 revoluciones por minuto. El observador realiza el seguimiento del desplazamiento de la imagen por medio del indicador hasta que el encargado del motor anuncia “7200

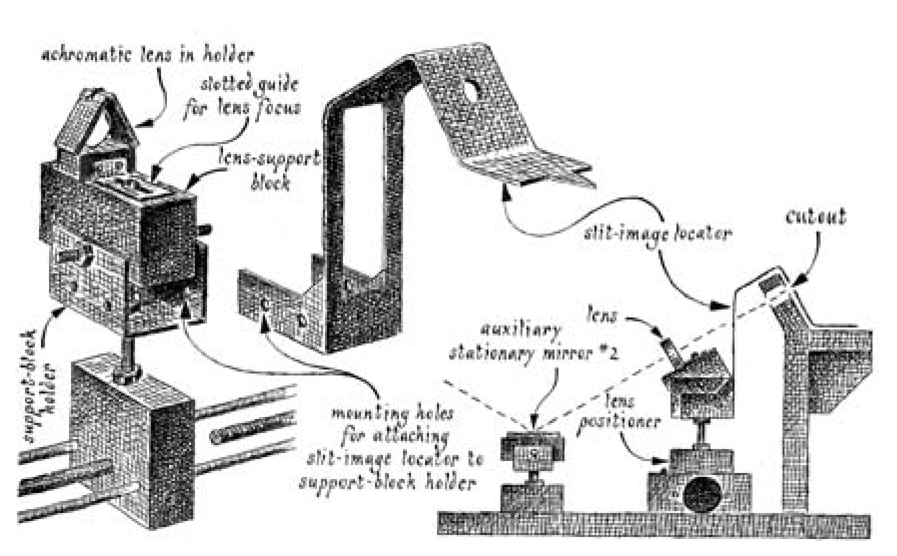
revoluciones”, momento en que él indica que ha registrado la posición de la imagen desplazada y se apaga el sistema.

El observador mide la distancia que hay entre la línea hecha sobre la mesa de registro (cero) y la punta del indicador mediante una lupa y un compás dotado de vernier. El experimento se repite por lo menos diez veces. La media de diez o más mediciones del desplazamiento de la imagen se acepta como resultado final.

Entonces puede procederse a calcular la velocidad de la luz del siguiente modo. La distancia total recorrida por la luz desde el frente de mi espejo rotatorio hasta su parte posterior era de 1,131 km. La distancia entre el espejo rotatorio y la imagen de la rendija sobre la pantalla era de 1857 cm. El promedio del desplazamiento de la imagen desde su posición inicial hasta la final en diez pruebas fue de 10,55 cm. El ángulo medio girado por el espejo rotatorio desde la posición inicial de la imagen hasta la posición media final es igual al arco cuya tangente es $10{,}55 / (2 \times 1857) = 0{,}1627$ grado. El motor hacía girar al espejo a un ritmo de $7200/60 = = 120$ revoluciones por segundo, lo que equivale a $120 \times 360 = 43\,200$ grados angulares por segundo. La luz estaba viajando desde la cara frontal del espejo rotatorio hasta la posterior durante el tiempo necesario para que el espejo girase 0,1627 grado, que es $0{,}1627/43\,200 = = 3{,}766 \times 10^{-6}$ segundo. Conforme a estos cálculos la luz atravesaría en un segundo $1{,}131/(3{,}766 \times 10^{-6}) = = 300\,318$ km por segundo. Como ya he dicho, el valor aceptado de la velocidad de la luz en el aire es de 299 792,5 km por segundo.



6. Mesa registradora del aparato



7. Aspectos del conjunto registrador

Es evidente que hay que mejorar las mediciones. Así, por ejemplo, basta un error de 0,01 cm en la lectura del desplazamiento de la imagen de la rendija de mi aparato para que se produzca un error de unos 200 km por segundo en la velocidad calculada. La determinación de la velocidad de rotación del espejo es igualmente crítica. Aunque la frecuencia de las redes de alumbrado público se supervisa cuidadosamente (lo que permite que determinados relojes eléctricos indiquen la hora de modo razonablemente correcto en promedio), en cualquier momento dado puede ser unas décimas de Hz superior o inferior a la nominal, por lo que es recomendable contrastar la velocidad del espejo rotatorio con un patrón de frecuencia de precisión conocida, como son los radiados por determinadas emisoras en las frecuencias portadoras de 2,5; 5; 10; 15 y 20 MHz.

Otros refinamientos que mejorarían la precisión de mi sistema serían la medición más precisa del trayecto óptico y de todas las demás dimensiones.

Hace más de trescientos años que se intenta establecer el valor de *c*, la velocidad de la luz, y su determinación dentro del margen de unos cuantos metros sigue eludiendo a los mejores experimentadores. En años recientes ha llegado a proponerse que la naturaleza no impone un límite de velocidad fijo y absoluto en el universo. ¿Cambia *c* con el paso del tiempo? Puede que los aficionados no seamos capaces de construir aparatos que permitan abordar esta pregunta, pero es divertido y muy instructivo intentarlo.

JUEGOS MATEMÁTICOS

Juan M.R. Parrondo

Experimentos con compresores de ficheros

Toda persona que utilice Internet se habrá dado cuenta de lo importante que es comprimir la información antes de enviarla a través de la red. Un nuevo modo de comprimir datos puede originar a veces una auténtica revolución en este mundillo, como ha ocurrido con el formato *mp3*. Pero la compresión de datos es un problema matemático cuya importancia va más allá de estas aplicaciones y afecta a cuestiones tan fundamentales como la definición objetiva del azar.

Claude Shannon demostró que el tamaño mínimo al que se puede reducir un fichero de datos es igual a su incertidumbre o entropía y mostró la manera de calcular esta entropía en ciertos casos [*véase* Juegos matemáticos del mes de agosto]. En este artículo mostraremos algunos experimentos sencillos que ilustran el teorema de Shannon y que nos ayudarán también a investigar cuánta información contiene un drama de Shakespeare o el *Ulises* de Joyce. Nos bastará para ello cualquier programa de compresión de ficheros para Windows, Macintosh o UNIX.

Uno de los algoritmos de compresión más conocido es el llamado de Lempel-Ziv (LZ). El programa *compress* del sistema operativo UNIX y todos los programas que generan ficheros *.arj*, *.zip* o *.gif* en Windows utilizan algunas de sus variantes. El algoritmo aprovecha de forma bastante simple las repeticiones de ciertas "frases" que aparecen en una cadena de bits, es decir, en una cadena de dígitos 0 o 1. Para ello se fragmenta primero la cadena de modo que no aparezca la misma frase dos veces. Esto se consigue colocando comas de forma sucesiva: se coloca una coma después del primer dígito; la siguiente se coloca de modo que el fragmento entre comas resultante sea el más corto posible que no haya aparecido antes, y así sucesivamente. Por ejemplo, en la cadena de bits:

1011100010101010100

la fragmentación proporcionará:

1,0,11,10,00,101,01,010,100

El lector puede observar que cada fragmento es siempre la concatenación de un fragmento aparecido con anterioridad y de un bit 0 o 1. Los llamaremos fragmento prefijo y bit adicional, respectivamente. Por ejemplo, el tercer fragmento, 11, es el primero seguido de un 1; el sexto fragmento, 101, es el cuarto seguido de un 1; y así sucesivamente. Podemos ahora numerar los fragmentos y sustituir cada uno de ellos por el número del prefijo y por el bit adicional. El 0 indicará por convención la falta de prefijo o "prefijo vacío". En nuestro ejemplo:

(0,1),(0,0),(1,1),(1,0),(2,0),(4,1),(2,1),(7,0),(4,0)

Finalmente se representan en binario los números que indican el prefijo para obtener una nueva cadena de bits. Veamos cómo se realiza este paso en nuestro ejemplo. Como hemos utilizado siete prefijos, se necesitan tres bits para representar cada uno de ellos:

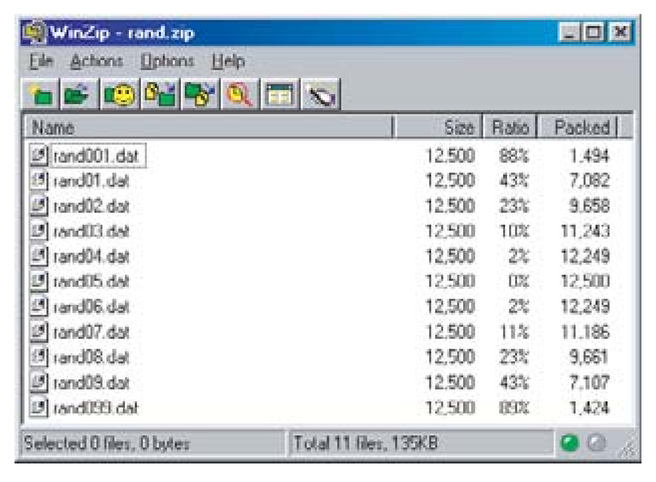
(000,1),(000,0),(001,1),(001,0),(010,0),(100,1),(010,1),(111,0),(100,0)

Ahora se pueden quitar los paréntesis y las comas y obtener así la cadena de bits comprimida:

000100000011001001001001010111101000

La descompresión es muy sencilla, puesto que la representación binaria del número del prefijo tiene siempre el mismo número de bits, tres en nuestro ejemplo. Sabemos entonces que cada fragmento está codificado por cuatro bits: tres para el prefijo y uno para el bit adicional.

La cadena resultante en nuestro ejemplo es bastante más larga que la original, en contra del propósito del algoritmo. Esto se debe a la escasa eficacia que éste tiene en el caso de cadenas muy cortas. Cuando se aplica a una cadena muy larga, los fragmentos cada vez son más grandes, mientras que el número de bits necesario para describirlos crece de manera más lenta. Por ejemplo, supongamos que una cadena de cien mil bits se ha dividido en mil fragmentos con un tamaño medio de cien bits (los primeros serán más cortos y los últimos más largos, probablemente). Para describir el prefijo no se necesitan más que 10 bits, ya que $2^{10} = 1024$. Por tanto cada fragmento estará codificado por 11 bits (los 10 del prefijo más el bit adicional), mientras que su longitud original era de 100 bits. Es decir, el algoritmo ha logrado comprimir este fichero de datos a un 10 % de su tamaño original.



1. El resultado de comprimir ficheros con cien mil bit aleatorios

Está claro que cuanto más largos sean los fragmentos, más eficaz será el algoritmo. Esto ocurre si la cadena tiene muchas repeticiones. El caso extremo es una cadena con todo ceros. En este caso la fragmentación es muy simple:

0,00,000,0000,00000,...

El lector con algunos conocimientos de matemáticas puede comprobar que una cadena con n ceros se dividiría en un número de fragmentos aproximadamente igual a la raíz cuadrada de $2n$. Para 1 megabyte, que son 8 millones de bits, tendríamos 4000 fragmentos y necesitaríamos sólo 12 bits para describir el prefijo. Por tanto, necesitaríamos 13 bits para describir cada fragmento o 52.000 bits para describir el fichero entero. Como un byte son 8 bits, el fichero habría quedado reducido a 6,5 kilobytes.

El caso opuesto es una cadena de bits cuya fragmentación contenga todas las subcadenas posibles. Por ejemplo, hay 28 subcadenas de 8 bits. Si la fragmentación resultara en una concatenación de todas ellas, se necesitarían 8 bits para describir el prefijo y 9 para describir el fragmento, mientras que la longitud original de los fragmentos es de 8 bits. El algoritmo resultaría perfectamente inútil en este caso.

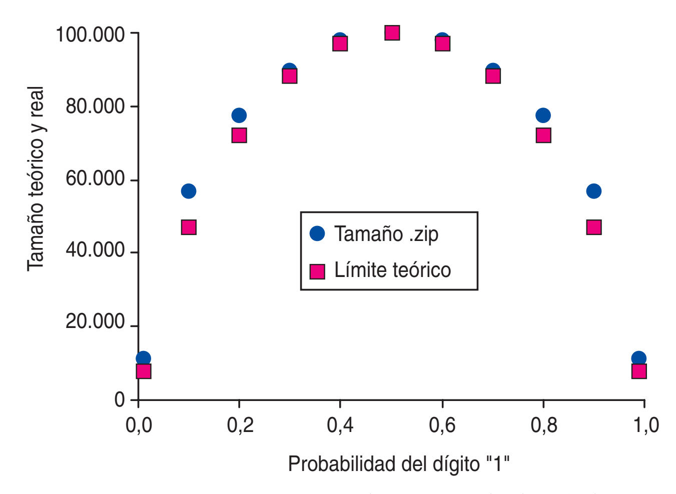
Como vemos, el algoritmo LZ es más eficaz cuanto más regular sea la cadena, cuantas más repeticiones contenga. Esta característica está de acuerdo con el teorema de Shannon: cuanto menor sea la entropía de una cadena, menos aleatoria y más regular es, por lo que puede comprimirse en mayor medida. De hecho se puede demostrar que el algoritmo LZ alcanza el límite mínimo impuesto por el teorema de Shannon para cadenas muy largas. Es por tanto un algoritmo óptimo, al menos en teoría y para cadenas suficientemente largas. Aunque veremos a través de nuestros experimentos que puede encontrarse bastante lejos de ese límite incluso para ficheros tan grandes como los textos completos de la Biblia o del *Ulises*.

Shannon demostró que si se forma una cadena de n bit aleatorios y completamente independientes unos de otros, la entropía de cada uno de ellos es:

$$H = -p \log_2 p - (1-p) \log_2 (1-p)$$

en donde p es la probabilidad de que el bit sea un 1 y el logaritmo se toma en base 2. La entropía de la cadena es nH.

Veamos cómo se comporta el algoritmo LZ frente a este tipo de ficheros. Utilizando algún lenguaje de cálculo matemático (BASIC, C o FORTRAN pueden servir) se pueden crear fácilmente ficheros de conjuntos de bits aleatorios, que sean igual a uno con probabilidad p e igual a cero con probabilidad $1-p$. Yo he utilizado un programa comercial de cálculo matemático y he creado los ficheros *rand001.dat*, *rand01.dat*, etc., que contienen cien mil bit aleatorios y en los que la parte numérica indica el valor de p (0,01; 0,1; 0,2, etc.). Luego he comprimido todos los ficheros con un conocido compresor de Windows y he hecho una gráfica comparando el tamaño de los ficheros comprimidos con la fórmula de Shannon. Hay que tener la precaución de multiplicar los tamaños de los ficheros en bytes (caracteres ASCII) por 8, ya que un byte es una unidad de información que equivale a 8 bits. El resultado se puede ver en las figuras 1 y 2.



2. Una comparación entre el tamaño de los ficheros .zip *y el límite teórico impuesto por el teorema de Shannon*

El algoritmo LZ funciona bastante bien. Por supuesto, está siempre por encima del límite inferior impuesto por el teorema de Shannon, pero no se aleja mucho de él. Reproduce maravillosamente la forma de la curva, con lo que se puede apreciar que la fórmula de Shannon refleja una propiedad a primera vista tan intangible como la cantidad de información que contenga un fichero. En efecto, la entropía de un fichero puede considerarse la información que contiene, puesto que es el tamaño mínimo al que puede ser reducido de forma reversible, es decir, de modo tal que pueda luego recuperarse intacto.

Vemos por tanto que el compresor de ficheros nos proporciona una medida de la información o entropía de éstos, aunque esta medida pierde mucha de su precisión cuando se utilizan ficheros cuyos datos no sean independientes. Podemos verlo aplicándolo a ficheros con textos literarios, como he hecho en la figura 3. Como textos españoles he utilizado ficheros con los diez primeros libros del Antiguo Testamento y con el Nuevo Testamento completo, mientras que para el inglés se han utilizado la Biblia, *Ricardo III* de Shakespeare y el *Ulises* de James Joyce. Los textos bíblicos admiten una compresión que está en torno al 68 % con independencia del idioma en que se encuentren, porcentaje que es significativamente mayor que el 61 % de la compresión de *Ricardo III*. El *Ulises*, con un 57 %, es el que menor compresión admite, lo cual indica que contiene menos repeticiones y es más impredecible que los anteriores.

En un fichero de texto, cada carácter ASCII (letra, número o espacio) ocupa 1 byte, es decir, 8 bits. Con una compresión del 68 %, cada carácter ocupa $8 \times (1 - 0{,}68) = 2{,}56$ bits, mientras que ocupa 3,44 bits con otra del 57 %. Es interesante contrastar estos datos con la entropía del inglés, medida por el propio Shannon, quien demostró mediante sus célebres teoremas que la entropía de cualquier símbolo de una



3. Compresión de ficheros de texto

lista de símbolos independientes es:

$$H = -p_1 \log p_1 - p_2 \log p_2 - p_3 \log p_3 - ...$$

siendo p_1 la probabilidad de que se dé el primer símbolo, p_2 la probabilidad de que se dé el segundo, etc. La entropía del inglés puede calcularse utilizando esta fórmula si se conoce la probabilidad con la que aparece cada letra en un texto normal y estas probabilidades pueden obtenerse analizando textos. Se encuentra, por ejemplo, que la letra más probable es la E, que aparece un 13 % de las veces, mientras que las menos probables son la Q y la Z, que aparecen sólo un 0,1 %. Aplicando la fórmula de Shannon se obtiene que la entropía de cada letra de un texto inglés es 4,03 bits. Obsérvese que la entropía por carácter sería $\log_2 27 = 4{,}76$ bits en una lengua en la que las 26 letras del alfabeto y el espacio entre palabras aparecieran con la misma frecuencia.

Pero un texto inglés no es un conjunto de caracteres independientes entre sí. Por ejemplo, existen pares de letras más comunes que otros. El par TH es, en inglés, el más común de todos y aparece un 3,7 % de las veces, mientras que el par QT no aparece nunca. Esta correlación o dependencia entre letras reduce la incertidumbre o entropía del inglés con respecto a los 4,03 bit calculados suponiendo que las letras sean independientes. Para tener en cuenta la correlación se puede aplicar la fórmula de Shannon a pares de letras en lugar de a letras individuales. En tal caso los símbolos a los que hacen referencia las probabilidades de la fórmula serán pares de letras, de los cuales existen $27 \times 27 = 6129$ (contando los espacios). La fórmula contiene entonces 6129 sumandos y su resultado es ligeramente inferior a 4,03.

Cuando en lugar de pares se consideran bloques de cuatro letras, la entropía se reduce a 2,8 bits por letra. Si como símbolos para la fórmula de Shannon se toman las palabras del diccionario inglés con sus respectivas probabilidades de aparecer en un texto, entonces la entropía que resulta es aproximadamente 9 bits por palabra, que equivale a 1,7 bits por letra. Puede continuarse este proceso considerando pares de palabras, y así sucesivamente. Obsérvese que las probabilidades de grupos de palabras dependen ya de aspectos gramaticales y semánticos de la lengua. Es decir, cuanto más amplio sea el bloque de letras o palabras con el que se calcula la entropía, más características de la lengua se recogen en dicho cálculo.

¿Puede calcularse la entropía del inglés teniendo en cuenta todas las posibles correlaciones, es decir, toda la estructura semántica y gramatical de la lengua? Shannon se dio cuenta de que es materialmente imposible registrar estadísticas de grupos amplios de palabras. Sin embargo, los angloparlantes sí han interiorizado esta estadística. A partir de esta idea concibió un modo de medir la entropía del inglés haciendo que una persona tratara de adivinar determinada letra de un texto cuando se le presentaban las n letras que la preceden. Puede entonces codificarse la letra por el número de intentos necesarios para adivinarla y considerar la entropía del inglés igual a la entropía de esta serie de números. Con este procedimiento obtuvo entropías que decrecen cuanto mayor es el número n de letras precedentes que se le muestran al individuo. Cuando n es 3 la entropía es aproximadamente 3 bits, parecida a la calculada tomando probabilidades de grupos de cuatro letras. Pero continúa descendiendo hasta 1,3 bits cuando se presentan las 100 letras precedentes a la que hay que adivinar. Cuando n es mayor de cien, la entropía se mantiene prácticamente constante e igual a 1,3 bits, que puede considerarse por tanto la entropía del inglés. Esto indica también que la estructura de la lengua hace que estén relacionadas las letras situadas a una distancia de hasta 100 caracteres.

¿Cómo pueden interpretarse nuestros experimentos a la luz de estos resultados? Es claro que el compresor no puede detectar toda la estructura de la lengua a partir de un texto, aunque sea tan voluminoso como el Nuevo Testamento o el *Ulises*. Hemos visto que logra reducir el fichero a 3,44 bits por carácter en el caso del *Ulises*. Esta es aproximadamente la entropía del inglés cuando se consideran grupos de 3 letras. Por tanto, el compresor sólo ha sido capaz de "detectar" la estructura de la lengua en este nivel de grupos de 3 letras. En el caso de la Biblia consigue comprimir hasta 2,56 bits por carácter, que es la entropía cuando se consideran grupos de 5 letras.

Teniendo en cuenta que hay 19.683 posibles grupos de 3 caracteres, 531.441 de 4 caracteres y 14.348.907 grupos de 5 caracteres, está claro que el *Ulises* no tiene tamaño suficiente para lograr captar las frecuencias de los grupos de 4 letras, aunque aparezcan todos o una fracción apreciable de ellos. Tampoco la Biblia completa podría captar la estadística de los grupos de 5 caracteres aunque contuviera una proporción importante de ellos. Que el compresor de ficheros haya logrado reducir el tamaño hasta 2,56 bits por carácter nos indica que sólo una muy pequeña fracción de grupos de 5 caracteres aparece en el texto: para codificar uno de los grupos que aparecen necesitamos sólo $2{,}56 \times 5 = 12{,}8$ bits, que equivalen a 212,8 = 7131 grupos, cifra muy inferior a los más de 14 millones de grupos posibles.

Se pueden realizar más experimentos de este tipo creando ficheros con bits aleatorios pero no independientes unos de otros, o con ficheros que contengan las notas de piezas musicales o programas de ordenador. Espero que los lectores me hagan llegar sus propias ideas y experiencias sobre el tema.

parr-km0@zenon.fis.ucm.es

AVENTURAS PROBLEMÁTICAS

Dennis E. Shasha

Verde es la esperanza, roja la ira

He aquí un rompecabezas de colores opuestos. Imagine una figura geométrica pintada en parte de rojo y en parte de verde. Si tal figura contiene al menos un punto rojo y al menos un punto verde que disten exactamente 10 cm, los matemáticos dirían, con su jerga maravillosamente abstrusa, que la figura cumple la condición bícroma de 10 cm. El problema de este mes consiste en tomar una figura sencilla, como lo son un segmento rectilíneo o un círculo, y determinar si cada configuración roja y verde concebible verifica la condición de los 10 cm.

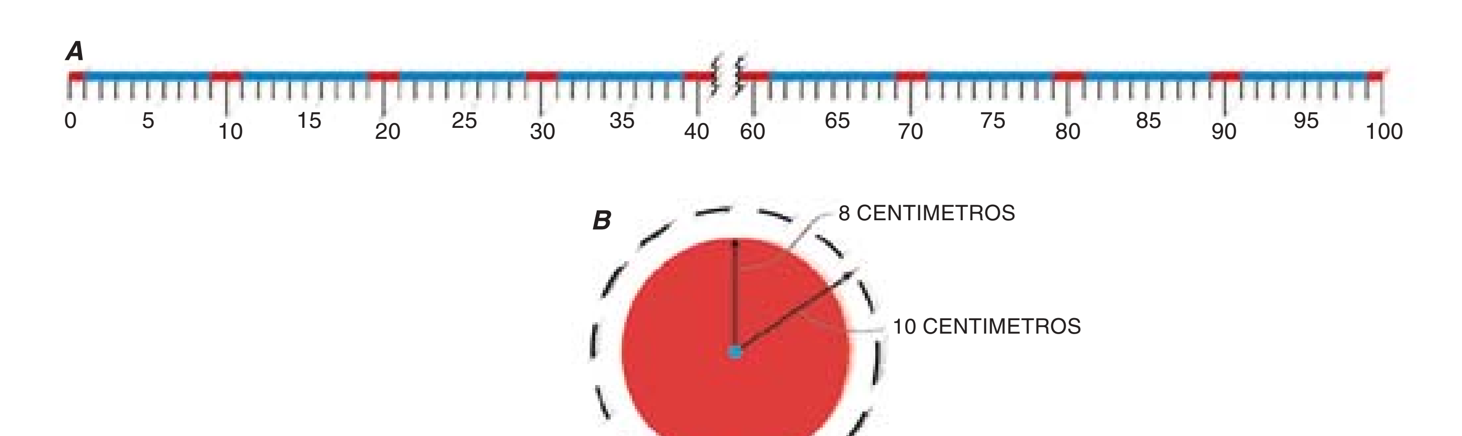
Como ejercicio preliminar tomemos un segmento rectilíneo. ¿Sabría usted dibujar sobre un segmento rectilíneo una figura bicolor que no satisfaga la condición bícroma del decímetro? Supongamos que el segmento tiene una longitud de un metro, con la marca de 0 cm en el extremo izquierdo y la marca 100 en el derecho (*A en la ilustración*). Se colorean de rojo los siguientes intervalos: 0-1, 9-11, 19-21, 29-31, 39-41, 49-51, 59-61, 69-71, 79-81, 89-91 y 99-100. Ahora se colorean de verde todos los demás. Observemos que cada punto de este segmento tendrá el mismo color que los situados a 10 cm de distancia, a su izquierda o su derecha. Esta configuración no cumple la condición de los 10 cm.

Pasemos a los círculos. Dado un círculo cualquiera, de radio menor que 10 cm, ¿sabríamos dibujar un motivo rojo y verde que no cumpliera la condición de los 10 cm? La respuesta es, como antes, afirmativa. Basta pintar de verde el centro y de rojo el resto del círculo (*B en la ilustración*). Cualquier punto que se halle a 10 cm del punto verde central se encontrará fuera del círculo.

Pero ¿y con círculos más grandes? Si el círculo tuviera un radio de 10 cm o más, ¿se podría dibujar una figura bicolor que no verificase la regla de los 10 centímetros? Si no pareciera posible, ¿podremos demostrarlo? Recordemos: al menos uno de los puntos del círculo ha de tener color rojo, y al menos uno, verde. La solución, el mes que viene.

Solución del problema del mes pasado:

Para determinar cuál de las cinco personas es absolutamente veraz, se le pregunta a A, "¿Dices tú siempre la verdad?". Si responde "sí", se le pregunta otra vez a A, "¿Quién de vosotros dice siempre la verdad?". Si A se señala a sí mismo, entonces A es absolutamente veraz, porque sus respuestas son coherentes. Si señala a otra persona, entonces ésa es la veraz. (En este caso las respuestas de A son incoherentes, luego tuvo que haber mentido la primera vez. Como sus respuestas son alternativamente falsas y verdaderas, la segunda respuesta ha de ser verdadera.) Si la primera respuesta de A hubiera sido "no", sabríamos que A miente una vez sí y otra no y que esta vez ha dicho la verdad. Por ello nuestra segunda pregunta habrá de ser "¿Quién no es veraz?". Como ahora su respuesta ha de ser falsa, señalará a la persona veraz. Esta solución es válida para un número cualquiera de personas.



Mark Fischetti

Pelotas de golf
Control de vuelo

La pretensión de lograr una pelota de golf que vuele a mucha distancia y con precisión se remonta a la Escocia del siglo XV. Los artesanos de la época rellenaban cansinamente con plumas de ganso hervidas bolsa tras bolsa de piel humedecida, que luego cerraban cosiéndolas. Las plumas se dilataban al secarse, mientras que la piel se contraía, y así se formaba una pelota dura como una piedra. Un productor con oficio no podía hacer más que cuatro al día, con lo que el juego quedaba limitado a los ricos.

Cuatrocientos años después, en el decenio de 1840, apareció la gutapercha. Los artesanos calentaban y moldeaban la gutapercha (goma del árbol malayo *Palaquium*, que se usó, y se usa, en odontología) formando con ella una esfera maciza. Duradera y barata, la gutapercha masificó el golf. Pero observaron los golfistas que las nuevas y lisas pelotas de gutapercha no volaban tan rectas ni tan lejos como las antiguas pelotas rugosas. Los fabricantes de pelotas empezaron a cortar, a martillar o a imprimir diversos patrones de muescas en la superficie de las pelotas, práctica que facilitó vuelos más rectos y largos. Pero nadie sabía por qué, pues la ciencia de la aeronáutica aún estaba en mantillas.

El golfista de Ohio Coburn Haskell y Bertram Work, empleado de B. F. Goodrich, presentaron una pelota de caucho en 1898. Tenía un núcleo de caucho macizo dentro de un devanado de hilo de caucho. Esas pelotas no tardaron en ser recubiertas de balata, látex robusto e hidrófugo producto del árbol tropical del mismo nombre. El ingeniero inglés William Taylor patentó en 1908 un patrón de convexidades uniformemente distribuidas al tresbolillo que se grababa en la superficie de la pelota; aquellos alvéolos reducían la resistencia aerodinámica y aumentaban la sustentación.

Hacia 1930 las sociedades de golf británicas y americanas habían normalizado el diámetro y el peso de las pelotas para competiciones. Desde entonces los fabricantes han probado toda suerte de patrones de alvéolos. Actualmente la mayoría de las pelotas de tenis muestran del orden 400 alvéolos. Ultimamente se ha estado experimentando con alvéolos de dos niveles con la esperanza de reducir aún más la resistencia aerodinámica.

Se quejan algunos golfistas de que el abuso de técnica ayuda demasiado a los jugadores. Puede que ayude a los torpes, pero no ha disminuido la destreza que necesitan los profesionales. Wally Uihlein, consejero delegado de Acushner, fabricante de la marca Titleist, apunta que “pese a las pelotas y a los palos de la era espacial, el tanteo medio del torneo PGA sólo ha mejorado en un golpe durante los últimos 17 años”.



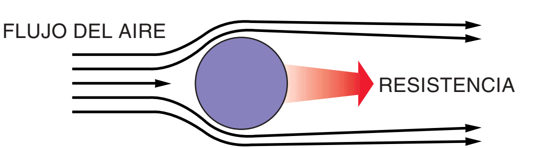
1. LA MAYORIA DE LAS PELOTAS MODERNAS son variantes de dos esquemas básicos. Las pelotas devanadas tienen un pequeño núcleo de caucho, macizo o relleno de líquido, dentro de un devanado de hilo de caucho. Las pelotas macizas tienen un núcleo de caucho, grande y macizo, con un delgado forro interno de polímero. El forro externo de uno y otro tipo puede estar compuesto de una o más capas de uretano o de una resina ionómera, tal como Surlyn de DuPont. Algunos profesionales prefieren los forros blandos de balata sintética para dominar mejor los efectos.

¿SABIA USTED QUE...?

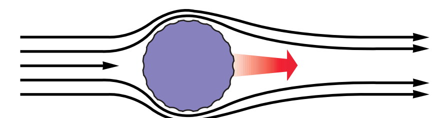
➤ **LA GUERRA DE LOS ALVEOLOS.** En 1983 Titleist introdujo la pelota 384 Tour con 60 alvéolos más. Los jugadores decían que alcanzaba mayores distancias. La competencia reaccionó siguiendo el soniquete de "más alvéolos para más distancia". Pero si ese argumento se llevara al extremo, miles de minúsculos alvéolos reproducirían una pelota lisa, que según los ensayos se mueve sólo la mitad que otra con alvéolos. Según Steve Aoyama, director de investigaciones de Titleist, la pelota que funciona mejor tiene de 300 a 500 alvéolos.

➤ **ANOTE SU NUMERO.** Los fabricantes pintan cifras diversas en las pelotas simplemente para que los participantes en una partida sepan qué pelota es de cada cual. Esos números nada tienen que ver con la calidad o con las características de la pelota. Pero los golfistas juran que golpearon una Top-Flite 2 más lejos que una 5, o que una Maxfli 1 se tuerce menos que una 6. ¿Supersticiones en el golf? Jamás.

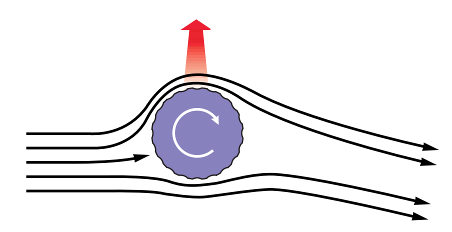
➤ **PRUEBA DE CHOQUE.** Hye Precision Products, de Perry (Georgia), ensaya la durabilidad de los núcleos de pelota de golf, la de la pintura e incluso los logotipos de nuevo cuño en una máquina cerrada y achaparrada de 1,1 tm. El cañón de aire del monstruo dispara 12 pelotas por minuto a una velocidad de hasta 90 metros por segundo, a través de una cámara de 1,5 metros, contra una plancha de acero templado. El mismo conjunto de pelotas se recoge automáticamente sin cesar, se recarga, vuelve a dispararse y se inspeccionan sus deformaciones y el estado de su superficie.



2. LA RESISTENCIA AERODINAMICA que se opone al vuelo de una pelota de golf lisa se debe a la diferencia entre la elevada presión del aire situado al frente de la pelota y la baja presión del que se encuentra tras ella, esta última causada por la separación del flujo laminar.



3. LOS ALVEOLOS producen turbulencia en la capa fina de aire que presiona a la pelota, lo cual reduce la separación del flujo, creando más contrapresión y reduciendo con ello la resistencia aerodinámica.



4. EL SOBREGIRO, que comunica a la pelota el ángulo del mazo del palo, desvía hacia abajo el flujo de aire del mismo modo que actúa un ala de avión inclinada. La consiguiente fuerza reactiva ascendente proporciona sustentación a la pelota.

CAUCHO (1898)



GUTAPERCHA (HACIA 1890)



PLUMAJE (HACIA 1400)

Revolución Científica

Robert Boyle

ENCYCLOPEDIA OF THE SCIENTIFIC REVOLUTION FROM COPERNICUS TO NEWTON. Dirigida por Wilbur Applebaum. Garland Publishing, Inc.; Nueva York, 2000.

THE WORKS OF ROBERT BOYLE. Edición preparada por Michael Hunter y Edward B. Davis. 14 vols. Pickering and Chatto; Londres, 1999-2000.

ROBERT BOYLE (1627-1691). SCRUPULOSITY AND SCIENCE, por Michael Hunter. The Boydell Press; Woodbridge, 2000. **ELEMENTS, PRINCIPLES AND CORPUSCLES. A STUDY OF ATOMISM AND CHEMISTRY IN THE SEVENTEENTH CENTURY,** por Antonio Clericuzio. Kluwer Academic Publishers; Dordrecht, 2000. **THE OCCULT LABORATORY.** Edición y ensayo introductorio de Michael Hunter. The Boydell Press; Woodbridge, 2001.

A caballo entre los siglos XVI y XVII nace la ciencia moderna, sentencian los manuales. Dicha así, sin mayor precisión, la frase cae en simplismo reduccionista del que puede salvarnos la lectura de *Encyclopedia of the Scientific Revolution from Copernicus to Newton*, un compendio espléndido de la gestación, alumbramiento y desarrollo de la Ciencia Nueva. En la pira de la Revolución no sólo arden tesis añejas; de su fuego emerge un nuevo talante en nuestra aproximación al mundo entorno, expresado en la adopción de métodos empíricos y la voluntad de controlar la naturaleza.

Aforismos hasta entonces indiscutidos se disuelven en su inanidad. La idea finalista de la naturaleza, la que sostiene que no opera en vano, cede paso a una concepción mecanicista del universo, carente de cualquier intencionalidad. No sólo no aborrece ya el vacío, pese a Aristóteles, sino que, dispuestos los medios necesarios, lo creará. Tampoco la natura es el mejor médico, tesis galenista; al cuerpo enfermo debe aplicarse un remedio químico de origen externo. Muchos son los autores que podríamos asociar a la renovación de la física o la medicina. Robert Boyle, figura máxima en una brillante segunda mitad del XVII inglés, destaca en ambas y en otros frentes. En esta *Encyclopedia* Edward B. Davis nos traza su perfil, uno de los numerosos que se recogen, entreverados con entradas extensas dedicadas a las teorías, disciplinas y técnicas que se configuraron.

Davis ha colaborado con Michael Hunter en la preparación de *The Works of Robert Boyle*, empresa benemérita que ha cristalizado en 14 volúmenes editados con todas las garantías del rigor académico y que reemplaza al elenco deficiente publicado en el siglo XVIII por Thomas Birch. Han puesto orden en un abigarrado maremágnum de 15.000 folios, entre borradores, notas de laboratorio, memoranda, cartas y un largo etcétera. El proyecto se inició a mediados de los ochenta, cuando Hunter se hizo cargo de la catalogación de los escritos de Boyle archivados en la Regia Sociedad de Londres, institución en cuya fundación en 1660 intervino éste.

Davis, Hunter (*Robert Boyle, (1627-1691. Scrupulosity and Science*) y Antonio Clericuzio (*Elements, Principles and Corpuscles. A Study of Atomism and Chemistry in the Seventeenth Century*) representan la nueva hornada de historiadores de la Revolución; los dos primeros, atentos a la exactitud histórica; el tercero, más interesado por el hilo conductor del desarrollo intelectual. Los tres beben en las fuentes del legado conocido o inédito (este último se hace público ahora en los volúmenes 13 y 14 de las *Works*).

Desde un comienzo Boyle reivindica la originalidad e independencia de sus ensayos de laboratorio y escritos. En *Certain Physiological Essays* subraya que no ha plagiado los trabajos del químico alemán Rudolph Glauber. Aquí, en *New Experiments touching the Spring of the Air and its Effects* y en *New Experiments and Observations touching Cold* aportó el esquema racional del método experimental y del valor de los ensayos. Si los racionalistas contemporáneos negaban al experimento un valor de prueba —sólo podía confirmar y, si acaso, refutar una hipótesis—, Boyle lo convierte en ingrediente esencial de la demostración.

Había nacido en el castillo de Lismore, en 1627. Era el decimocuarto hijo de Richard Boyle, primer conde de Cork, hombre adinerado e influyente del período isabelino. Robert Boyle estudió tres años en el Colegio Eton. De 1639 a 1644 emprendió un largo viaje por Francia, Italia y Suiza bajo la tutoría de Isaac Marcombes. Fue entonces, recordaría andando el tiempo, cuando, atrapado en medio de una tormenta terrorífica, experimentó una suerte de conversión interior. Prometió que, si Dios le sacaba del apuro, se entregaría a su causa de por vida; compromiso que mantuvo con firmeza y explica la polaridad de su obra, teológica y científica.

En 1645, se instaló en Stalbridge Manor de Dorset, que había heredado a la muerte de su padre. Allí redactó sus primeros escritos, de carácter religioso y moral, algunos de los cuales se publicarían años más tarde: "Account of Philaretus During his Minority" (autobiográfico), *Aretology*, *The Martyrdom of Theodora and Didymus, A Free Discourse against Customary Swearing* y primeras versiones de *Seraphick Love* y *Occasional Reflexions upon Several Subjects*.

Lo mismo en la introducción a las *Works* que en *Scrupulosity and*

Science, Hunter insiste en señalar el corte que existe entre esas preocupaciones iniciales y su obra posterior. Hiato tan brusco se produciría entre 1649 y 1654. Terminaba una etapa de estudio de lenguas clásicas (caldeo, hebreo, siríaco y griego) en las que se había enfrascado para una intelección más profunda de los textos bíblicos y religiones antiguas, e incoaba otra de primeros ensayos con el horno y laboratorio recién instalados en Stalbridge. Tal es la atracción que siente por la nueva labor, que decide entregarse por entero a la ciencia empírica, a la inquisición directa de los fenómenos. Entra entonces en contacto con el círculo de Hartlib y se deja guiar por Digby. William Petty le enseña disección y vivisección. Se familiariza con la obra de Glauber y otros químicos, con la de Jean Baptiste van Helmont, muy en particular. En el diario de Boyle correspondiente a enero de 1649 hay notas sobre fermentos y espíritus químicos, dos capítulos nucleares del pensamiento yatroquímico.



Robert Boyle (1627-1691), uno de los principales artífices de la introducción del método experimental en la ciencia

Las primeras páginas de *Some Considerations Touching the Usefulness of Experimental Natural Philosophy* se gestan entre 1648 y 1650. Alaba a Paracelso y critica a los médicos galenistas. Pese a sus múltiples extravagancias, el suizo mejoró nuestro conocimiento de la naturaleza y produjo útiles remedios. Con paracelsistas y helmontianos sostiene que en el cuerpo humano se desarrollan numerosas reacciones químicas; por ejemplo, la digestión, que interpreta en términos químicos (disoluciones, fermentos y nuevos mixtos). Le apasiona la búsqueda del *alkahest*, el disolvente universal de van Helmont. Boyle veía en él un instrumento de análisis disociativo mucho más poderoso que el fuego para conocer la composición y textura de los cuerpos.

No es ajeno al mecanicismo imperante. De entre 1651 y 1653 data el manuscrito, inacabado, dedicado al atomismo: "Of ye Atomicall Philosophy". Aunque matiza su adscripción. Leucipo, Demócrito y Epicuro, el atomismo clásico, defienden unos componentes últimos, puntuales, matemáti-

Mecánica cuántica avanzada

QUANTUM MECHANICS, por Karl T. Hecht. Springer-Verlag; Nueva York, 2000.

Desde 1930, fecha en que apareció la primera edición de "Los Principios de la Mecánica Cuántica" de Paul Dirac, hasta nuestros días se han publicado centenares de libros de texto sobre mecánica cuántica. Muchos de ellos, como el que nos ocupa, son el resultado de años de enseñanza de esta disciplina en la universidad. Sucede que en tan dilatado período de tiempo la mecánica cuántica ha sufrido algunos cambios, si no en sus cimientos (la cuarta edición del libro de Dirac, de 1958, se sigue usando como texto de apoyo en muchas universidades), sí en cuanto al énfasis que se pone en ciertos aspectos conceptuales (inseparabilidad, entrelazamiento o existencia de diversas interpretaciones del formalismo matemático) y en la aparición de nuevas aplicaciones (información y computación cuánticas). El libro de Hecht es, sin embargo, un libro "clásico" en su estructura y objetivos. Está dirigido a quienes vayan a usar esta disciplina como herramienta de cálculo en el ámbito de la física atómica, molecular, del estado sólido y de altas energías, y no a los interesados en aspectos conceptuales o en otras aplicaciones más recientes.

Para sacarle el debido provecho se requiere haber pasado por al menos un curso introductorio a la física cuántica. Es una obra muy ambiciosa y densa: a lo largo de sus 760 páginas presenta una introducción a la mecánica cuántica (de 200 páginas), aborda la teoría de perturbaciones independientes del tiempo, dedica 100 páginas al estudio del momento angular, otras 200 a la teoría de colisiones y a las perturbaciones dependientes del tiempo, aborda también el estudio de los sistemas de partículas idénticas y las interacciones átomo-fotón. Termina con sendas introducciones a la mecánica cuántica relativista y a las técnicas de cálculo en sistemas de muchos cuerpos.

Algunos capítulos incluyen problemas (hasta un total de 50), acompañados en ocasiones de su solución. Contiene métodos de cálculo especiales para ciertos problemas, difíciles de encontrar en otros libros. Su estructura en capítulos muy cortos (a veces casi fi-

cos y dotados de propiedades mecánicas, postulado en el que no difieren las versiones gassendistas contemporáneas; a Boyle le interesan más los *minima naturalia*, partículas de materia con propiedades químicas que resultan de las reacciones. Los límites del atomismo, señala, quedan patentes en su incapacidad para explicar la generación de los animales y en su conocimiento inadecuado de las propiedades del mercurio. En realidad, sigue una tendencia iniciada, a principios del siglo XVII, por Angelo Sala y Daniel Sennert, en cuyas obras leemos sobre experimentos que dicen aportar pruebas de la existencia de los átomos y, a la recíproca, que los procesos químicos se explican en términos de partículas de materia. De esa época temprana procedía también la asunción de la noción de *semina rerum* por la teoría corpuscular de la materia. Anselmus Boethius de Boodt, Sennert y Etienne de Clave, entre otros, postulan que la materia no sería homogénea porque hay ciertas partículas dotadas de potencias, en concreto de una fuerza formativa.



Portada del libro Nuevos experimentos sobre el espacio vacío*, de Otto von Guericke (1602-1686), que ejerció un influjo decisivo en los trabajos pneumáticos de Boyle*

Boyle abundará, mediado el decenio de los cincuenta, en la cuestión de los principios de los cuerpos compuestos en "Reflexions on the Experiments vulgarly alledged to evince the 4 Peripatetique Elements, or ye 3 Chymicall Principles of Mixt Bodies", manuscrito que constituye un alegato experimental contra la teoría aristotélica (los cuatro elementos) y paracelsista (los *tria prima*) de la materia. A lo largo de sus escritos posteriores irá articulando la estrecha vinculación entre teoría corpuscular y experimentación química, pergeñada en esos escritos primerizos.

En 1655 se trasladó a Oxford. Allí residirá hasta 1668. Acude a la tertulia científica presidida, primero, por John Wilkins y, desde 1659, por él mismo. Fue un tiempo especialmente fructífero. Cierto es que había empezado a escribir *Sceptical Chymist* y *Some Considerations Touching the Usefulness of Experimental Natural Philosophy* antes de ese traslado, pero ambas, helmontianas en sus esbozos, sufrieron una profunda revisión en la nueva atmósfera oxoniense. (En *The Sceptical Chymist*, por ejemplo, criticará la teoría de van Helmont del agua y los *semina* como los principios de los cuerpos naturales.)

Se asegura la colaboración de Robert Hooke, quien le ayuda en la construcción de una bomba de aire con la que poner de manifiesto el error aristotélico sobre la imposibilidad del vacío. Inspirado, en efecto, en los trabajos realizados en Regensburg por Otto von Guericke, acomete una serie de experimentos donde demostró las características físicas del aire y la necesidad de éste para la combustión, la respiración y la transmisión del sonido. Compiló los resultados en *New Experiments Physio-Mecanicall, Touching the Spring of the Air and its Effects*, que aparecen en 1660. Corroboró que los fenómenos del experimento de Torricelli estaban causados por el aire, que el sonido era imposible en el vacío y que el aire, permanentemente elástico, resultaba imprescindible para la vida de la llama. Cuando se construye un barómetro llenando un tubo de cristal con mercurio, invirtiéndolo y sumergiéndolo por el extremo abierto en una cubeta de mercurio, el líquido del tubo cae hasta que la presión del mercurio dentro del tubo equilibra la presión del aire fuera del mismo. En condiciones atmosféricas normales, el mercurio se halla a 76 centímetros de altura. El espacio que hay en el tubo por encima del mercurio se halla vacío. Aunque quizás el más influyente de todos sus experimentos *in vacuo* fueran los que mostraban que muchos frutos y vegetales contienen aire (dióxido de carbono), que expulsan durante la fermentación (el "aire fijo" de los químicos del siglo XVIII). A la segunda edición de *Spring of the Air*, dos años después, añadió la ley de Boyle, según la cual a temperatura constante el volumen de un gas es inversamente proporcional a la presión.

Simultáneamente aparecen otros dos importantes tratados: *Certain Physiological Essays* y *The Sceptical Chymist*. Si aquél recogía sus primeros borradores sobre la teoría corpuscular, en éste somete a criba las tradiciones aristotélica y paracelsista y reclama de los químicos un mayor vuelo teórico. Al refutar los elementos aristotélicos (tierra, aire, fuego y agua) y los principios espagíricos (sal, azufre, mercurio) no renuncia a la posibilidad

de descubrir sustancias químicas simples. Lo que Boyle atacaba era la doctrina paracelsista de que un número pequeño de sustancias simples fueran los ingredientes de *todos* los cuerpos y pudieran extraerse de todos los cuerpos *mixtos* por medio del análisis pirético. Y lo que proponía era aumentar el número de "familias químicas"; en su opinión, los químicos habían basado sus clasificaciones en unas cuantas similitudes que mostraban diversas sustancias, ignorando las diferencias que podrían manifestarse en cuanto se ejecutaran los experimentos apropiados.

Establece el estatuto de la química en *History of Colours*, pero no queda nítidamente separada de la alquimia. Investiga la naturaleza de los colores para entender el mecanismo en cuya virtud la materia modifica la luz. No acepta un origen químico del color, ni que éste dependa de la forma y tamaño de los átomos. Los colores resultan, en su opinión, de la textura de los corpúsculos. Y descubrió que podía identificar sustancias a través de los cambios de color que observaba en el curso de las reacciones químicas. No sólo algunos, sino todos los ácidos, registra en *Experiments and Considerations Touching Colours*, tornaban rojo el jarabe azul de violetas; todos los álcalis volvían verdes esa misma sustancia. De donde distinguió entre ácidos, álcalis y compuestos neutros. A diferentes álcalis corresponden distintos precipitados cromáticos. Sus ensayos le permitieron hablar de la composición de sustancias en términos de componentes empíricamente determinados. Quizá fue ésta su principal contribución a la química. Todo ello, sin dejar de compartir secretos alquimistas con George Starkey.

Colabora desde muy pronto en las "Phylosophical Transactions" publicadas por su amigo Henry Oldemburg. La contribución inicial de Boyle a esta primera revista científica tomó la forma de breves informes junto con una serie de "Inquiries" referentes a diversos aspectos de la historia natural. En 1666 aparecieron dos aportaciones más extensas: "Account of a New Kind of Baroscope" y su "New Frigorifick Experiment". Dos años después, se sirve de la revista para explayarse en torno a las relaciones experimentales entre la luz y el aire, y, en 1670, sobre la respiración. En su fisiología, las teorías mecanicistas desempeñan un papel menor, en tanto que la mayoría de los procesos metabólicos reciben una explicación química.

En 1666 da también a la imprenta *The Origin of Formes and Qualities* y prepara *A Free Enquiry into the Vulgarly Receiv'd Notion of Nature*, publicada tras profunda revisión en 1686. Consagradas ambas a la filosofía natural, Boyle muestra la superioridad e idoneidad para el progreso técnico del corpuscularismo sobre la escolástica. En *The Origin of Formes* desarrolla la clasificación de los corpúsculos, esquematizada en *Usefulness*. Parte de las partículas elementales, de las *minima* o *prima naturalia*. Mas, a diferencia de lo que significaban en el manuscrito sobre el atomismo, aquí por *minima naturalia* debe entenderse los corpúsculos dotados de propieda-

Luz y visión

The Fire within the Eye. A Historical Essay on the Nature and Meaning of the Light, por David Park. Princeton University Press, Princeton, New Jersey, 1997.

David Park, profesor emérito de física en el Williams College, es un autor de reconocido prestigio en el campo de la divulgación científica. Entre sus libros destacan *Introduction to the Quantum Theory*, *The Image of Eternity* y *The How and the Way*.

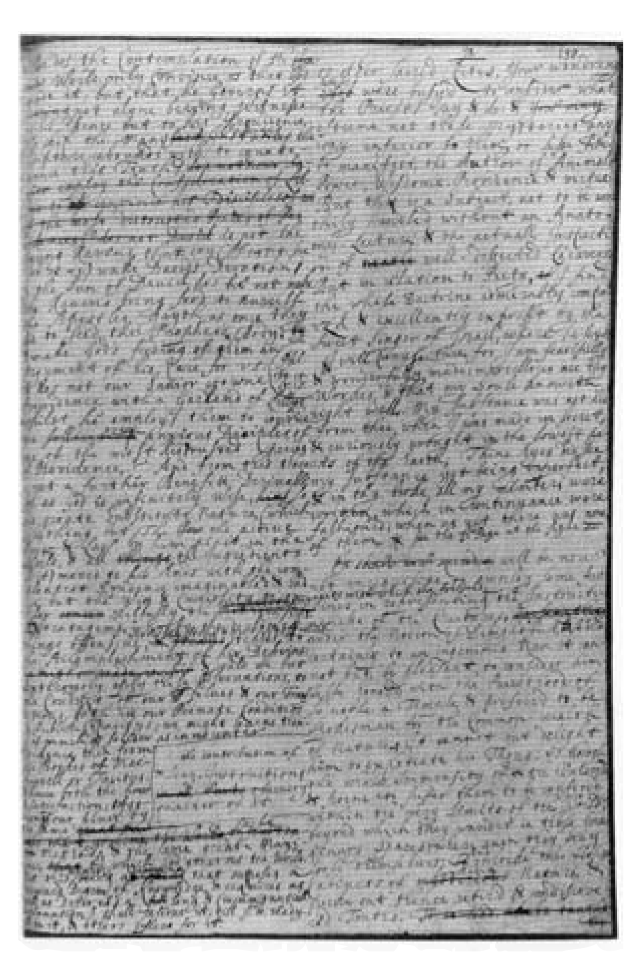
El libro que comentamos es un ensayo histórico sobre la naturaleza y el significado de la luz, como dice el subtítulo, y cumple bastante bien con el ambicioso objetivo que nos propone el autor. Park nos ilumina el oscuro camino que ha seguido a lo largo de la historia el concepto de la luz, desde las primeras ideas de los filósofos griegos hasta las teorías cuánticas actuales.

Aunque se trata de un libro fundamentalmente de historia de la ciencia, el contenido se extiende hacia todos los aspectos conceptuales relacionados con la luz y su percepción por el hombre, incluidos los relacionados con la religión, el bien y el mal, tradicionalmente asociados con la luz y las tinieblas. Park no elude hablar de difíciles cuestiones físicas, y lo hace magistralmente sin exponer fórmulas matemáticas, pero sin perder por ello el rigor ni la claridad. El libro se hace así accesible a quienes no son expertos en ciencias y se convierte en un relato ameno y a veces apasionante. Se nos incita incluso a reproducir con elementos simples los experimentos que intrigaron a los grandes científicos del pasado.

Entre los aspectos más importantes de la luz están los relacionados con el arte. Park habla de la luz que en la Edad Media iluminó a través de vidrieras las catedrales góticas. También nos cuenta cómo se llegó a reproducir la realidad en los cuadros del Renacimiento, utilizando la perspectiva. Pero se detiene ahí en lo que al arte se refiere. A nuestro entender hubiera sido interesante seguir por este camino, y ver la diferente visión del color y de la luz en artistas de épocas más recientes. Por ejemplo, la de los impresionistas, relacionadas con la teoría de la descomposición de la luz en colores elementales, o la de las vanguardias del siglo XX, deshaciendo el espacio de la perspectiva.

The fire within the eye responde a muchos interrogantes que el hombre se ha hecho a lo largo de la historia sobre la naturaleza física de lo que vemos, pero, al final, compartimos con el autor una pregunta: ¿qué es la luz? El sentido profundo de su significado queda todavía en sombras, como les pasaba a los hombres prisioneros en la caverna en el mito de Platón.

des mecánicas, vale decir, forma, tamaño y movimiento. A través de una estrecha unión, estas partículas primarias forman "corpúsculos de segundo orden", que, al ser muy pequeños, no pueden percibirse por los sentidos, se disocian muy raramente y permanecen inalterados en los cuerpos naturales que integran. Tales corpúsculos se asocian en cúmulos de un orden superior. Ahora bien, a diferencia de los *minima naturalia* (es decir, los corpúsculos de primer orden), los corpúsculos de segundo orden (y de orden superior) no sólo tienen propiedades mecánicas sino también químicas. Para Boyle, las propiedades de los corpúsculos compuestos pueden ser enteramente diferentes de las partículas de que constan; aquéllos dependen de las diferentes texturas de corpúsculos simples. Una clase especial de corpúsculos de segundo orden eran los principios seminales, dotados de un poder formativo, que intervienen en la generación de animales y plantas.



Hoja del manuscrito de Boyle "Sobre el estudio del Libro de la Naturaleza". Puede apreciarse su forma de trabajar: el texto original, escrito en la mitad derecha de la página, sufría numerosas adiciones en la mitad izquierda

De salud precaria y vista delicada, sufrió un ictus en 1670. Se servía de amanuenses, lo que se refleja en los textos que parecen más una exposición al dictado que una obra de estilo depurado. A uno de esos amanuenses redactó "An Interview with Lord Tarbat, 3 October 1678" (*The Occult Laboratory. Magic, Science and Second Sight in Late 17th Century Scotland,* que incluye, amén de la entrevista, numerosos escritos sobre el fenómeno paranormal de la visión del futuro: *The Secret Commonwealth*, de Robert Kirk, cartas de Garden a John Aubrey, correspondencia varia de Samuel Pepys, la *Deuteroskopia*, de John Fraser, y cuestiones y respuestas sobre el particular, redactadas por Edward Lhuyd y Robert Wodrow, John Fraser y John MacLean).

Lo mismo que reputaba ciencia a la alquimia, Boyle no tiene reparo en traer al campo del conocimiento objetivo la visión del futuro, una facultad que parecía darse en grado notable en las Highlands. Estimulados por él, varios autores se propusieron descubrir el fundamento real de la capacidad de anticipación, en particular el ministro Robert Kirk, autor de *The Secret Commonwealth*. Los escritos ahora recuperados iluminan las actitudes vacilantes sobre la relación entre lo natural y lo preternatural en los comienzos de la Regia Sociedad, de una manera muy señalada gracias al propio Boyle, cuya vida se cruza con la de Kirk cuando éste se propuso escribir una Biblia gaélica en romance a expensas de aquél.

Cuando la Regia Sociedad lo eligió su presidente en 1680, Boyle declinó tal honor por razones de conciencia. En ese período final de su vida prosiguió sus trabajos de laboratorio con la ayuda de auxiliares, con los cuales fundó una empresa química. En 1680 y 1682 descubrió las principales propiedades químicas y físicas del ácido fosfórico. Si años antes exponía en *Some Considerations Touching the Usefulness of Experimental Natural Philosophy* su confianza en mejorar la condición humana a través de la aplicación de la química a la medicina, considerada en su quíntuple vertiente: fisiológica, patológica, semiótica, higiénica y terapéutica, ahora en las *Memoirs for the History of Human Blood* (1684) avanzaba en la identificación de los componentes químicos de la sangre. Señalaba que había obtenido de la destilación de la sangre partes oleosas y flemáticas, así como un líquido que él identificó como el "espíritu de la sangre humana". La medicina constituía parte integrante de su filosofía natural.

Pieza testamentaria largamente madurada, *A Free Enquiry into the Vulgarly Received Notion of Nature* despliega en un solo propósito todo su saber naturalista, médico, filosófico y teológico. Frente a quienes describen una naturaleza sabia, benevolente y dotada de una finalidad, Boyle repone que no es más que una inmensa máquina impersonal creada por un Dios infinito y personal. Carece de sentido atribuir mente a la materia. La naturaleza no era más que un mecanismo de relojería que el Creador había puesto en movimiento en el comienzo de los tiempos y ahora funcionaba de acuerdo con las leyes segundas que podían ser estudiadas por la ciencia. Boyle murió el 31 de diciembre de 1691.

LUIS ALONSO